

Zur Statik von Seilnetzkühltürmen

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum

von
Dipl.-Ing. Saher Al Haj-Issa
Nablus-Palästina

Bochum 1979

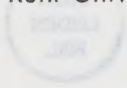


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546403_0043

Zur Statik von Seilnetzkühltürmen

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum



von
Dipl.-Ing. Saher Al Haj-Issa
Nablus-Palästina

Bochum 1979

Zur Statistik von Zahnarztbüchern

Verfasser:

Dr.

Ernst von Cramer

Lehrer für Zahnheilkunde

an der

Universität zu Bonn

in Bonn



Dr.

Dr. med. Dr. phil. Dr. jur.

Dr. phil. Dr. jur.

Bonn 1879

Dem Andenken meines Vaters
Mouhiddin Al Haj-Issa

Zusammenfassung

Das Tragverhalten eines Seilnetz Kühlsturms kann durch verschiedene Parameter entscheidend beeinflusst werden. Im Vordergrund dieser Untersuchungen stehen die Systemparameter: Größe der Vorspannung, Höhenlage, Steifigkeit und Anzahl der Speichenräder. Der Einfluß dieser Parameter wird in der vorliegenden Arbeit in einer Reihe von Studien demonstriert. Dabei stellt sich heraus, welche untersuchten Größen von besonderer Bedeutung sind. Daraufhin lassen sich Kriterien abschätzen, die für eine Dimensionierung wichtig sind. Außerdem wird die geometrische Nichtlinearität dieser Art von Konstruktionen an Hand von Beispielen untersucht.

Summary

The behavior of a cable net-work cooling tower can be influenced efficiently by a number of parameters. The object of the present work is the investigation of the main parameters. These are the magnitude of the prestressing and number, position such as stiffness of the intermediate rings. Alternating these parameters results are obtained, demonstrating the effect of these factors and of their interaction. At the end some criteria are developed to be considered in design of the cable net-work cooling towers. The geometric non-linear behavior which is characteristic for this type of structures is investigated on some examples in detail.

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1976 bis 1979 am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der dortigen Abteilung für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

Herrn Prof. Zerna und Herrn Prof. Schrader danke ich herzlich für die Übernahme der Referate und die ständige Unterstützung. Herrn Prof. Schrader danke ich für die Übergabe des Programmsystems MESY.

Saher Haj-Issa

Referenten: o.Prof.Dr.-Ing.Dr.-Ing.E.h. Wolfgang Zerna
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Schrader

Tag des Einreichens : 25. Januar 1979

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 1979

c 1979 Dr.-Ing. Saher Haj-Issa
Hustadtring 37, 4630 Bochum
Postfach 1253, 4630 Bochum

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen. Mit Genehmigung des Autors ist es gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise zu vervielfältigen.

10. Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	5
1.1 Jüngste Entwicklungen	5
1.2 Charakteristische Eigenschaften	8
1.3 Maßgebende Parameter	10
1.4 Ziel eigener Untersuchung	11
2. Stand der Technik	13
2.1 Übersicht	13
2.2 Konstruktionsprinzip	15
2.3 Maschenarten und Seilführung	17
2.4 Bauablauf und Ausführung	20
2.5 Montage der Beplankung	22
2.6 Maßgenauigkeit	24
2.7 Statische Berechnung	26
3. Zur Theorie Mechanischer Systeme (Mesy)	29
3.1 Entwicklung und Übersicht	29
3.2 Verschiebungsvektoren in LAGRANGE'scher Beschreibung	29
3.3 Die virtuellen Verschiebungen und Transformations- koeffizienten	32
3.4 Systemgleichungen mit dem Prinzip von D'ALEMBERT in LAGRANGE'scher Fassung	34
3.5 Linearisierung der Systemgleichungen bei geometrisch nichtlinearen statischen Problemen	36
3.6 Iteration und Konvergenz	40
4. Zur Numerischen Berechnung	44
4.1 Rechenannahmen	44
4.2 Programmsystem MESY	46
4.3 Datenprogrammsystem	47
4.4 Anwendungsbeispiel	48
4.5 Demonstrationssystem	52

	Seite
5. Geometrische Nichtlinearität	59
6. Vorspannungszustand	63
6.1 Wirkungsweise der Vorspannung	63
6.2 Problem der Formfindung	64
6.3 Zu den Minimalflächen	67
6.4 Einfluß des Vorspannungsgrades	68
7. Ringversteifte Seilnetzkühltürme	73
7.1 Einfluß der Höhenlage eines Versteifungsringes	73
7.2 Einfluß der Anzahl der Versteifungsringe	77
7.3 Einfluß der Steifigkeit der Speichenseile	84
8. Schlußbetrachtungen	87
9. Verzeichnis der Tabellen und Bilder	89
10. Literaturverzeichnis	91

1. Einleitung

1.1 Jüngste Entwicklungen

Nach dem Bau der vorgespannten Seilnetzkonstruktionen über den Sportstätten für die XX Olympischen Spiele 1972 in München /51/ wurde 1973 der Auftrag zum Bau des ersten Seilnetzkühlturms /69,70,71/ für ein 300-MW-THTR-Kernkraftwerk erteilt (Bild 1,/53/). Dieser Turm ist eine gemeinsame Entwicklung der BALKE-DÜRR-Werke AG und des Ingenieurbüros LEONHARDT und ANDRÄ. Für seine statische Berechnung hat das Rechen- und Entwicklungsinstitut für EDV im Bauwesen (RIB-Stuttgart) ein FE-Programm aufgestellt. Zum Prüflingenieur wurde Prof.Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W.ZERNA benannt. An der Planung, Ausführung und Lieferung der Konstruktionselemente und Hauptgewerke haben sich 18 Büros, Institutionen und Firmen beteiligt. Die Erfahrungen, die beim Bau des deutschen Pavillon auf der Expo'67 Montreal /52/ und des Olympiadaches in München gemacht wurden, sind in dieser Konstruktion eingeflossen. Mit ähnlichen Entwicklungen hat sich die Firma KRUPP Industrie- und Stahlbau /15, 16/ befaßt. Hier ist auch zu erwähnen, daß FREI OTTO schon 1962 in /62/ zugbeanspruchte Mantelflächen aus Membranen und Seilnetzen demonstriert hat. Der Vorstoß ins Neuland der Seilnetzkühltürme hat ein Entwicklungsfeld mit vielen neuen Fragen eröffnet.

Darüber hinaus hat sich in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland eine lebhafte Entwicklung auf dem Sektor des Naturzugkühlturmbaus vollzogen. Diese Entwicklung wurde durch die immer



Bild 1: Plotterzeichnung Seilnetzkühlturm
Schmehausen

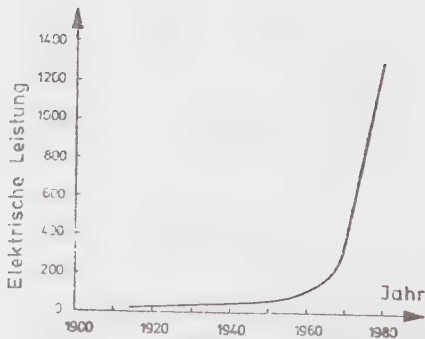


Bild 2: Schematische Darstellung
der Entwicklung der
Kraftwerksblöcke in der BRD

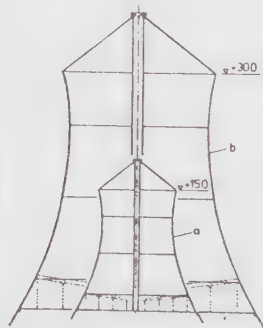


Bild 3: Zwei Seilnetzkühltürme gleicher
Leistung in Relation zu einem
1200MW - Kernkraftwerk
a) bei Narkühlung b) bei Trockenkühlung

größer werdenden nuklearen Anlagen einerseits /32, 46/ und durch den Übergang zur Trockenkühlung andererseits /12, 33, 46, 47/ ausgelöst. Man ist heute bereits bei Blockgrößen von 1300 MW Leistung angelangt (Bild 2). Die Abmessungen des Trockenkühlturms Schmehausen reichen für ein Kernkraftwerk von 1200 MW im nassen Betrieb aus, also rund dem 2,5 fachen der ausgelegten elektrischen Leistung im trockenen Betrieb (Bild 3). Im Zuge dieser Entwicklung werden heute Kühltürme mit ca. 170 m Höhe errichtet. Höhen von ca. 200 m sind in der Planung, und man spricht sogar schon von Kühltürmen mit 300 m Höhe und entsprechend großem Durchmesser.

Um Kühltürme derartig ungewöhnlicher Dimensionen mit ausreichender Sicherheit wirtschaftlich erstellen zu können, ist in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Stahlbetonkühltürme eine Vielzahl von Literatur erschienen. Die Variation von geometrischen Kenngrößen der Stahlbetonkühltürme ist der Schwerpunkt in den Schriften von ZERNA /95, 96, 97/, KRÄTZIG /43, 44, 45/, HAMPE /25, 26/ und auch in anderen Arbeiten /28, 50, 66/. Versteifte Stahlbetonkühltürme waren ein bedeutendes Thema der theoretischen, experimentellen und numerischen Forschungen von und um ZERNA /98, 99, 100, 101/, die dazu geführt haben, daß zahlreiche Arbeiten /10, 11, 50/ entstanden. An der experimentellen Klärung hat dabei MÜNGAN /57/ wesentlichen Anteil präsentiert.

Auf dem Gebiet der Seilnetz-Kühltürme sind über den Einfluß verschiedener Parameter noch keine Arbeiten veröffentlicht worden. Es war deshalb dringend erforderlich dieses Gebiet zu erforschen.

1.2 Charakteristische Eigenschaften

Seilnetze sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Elemente nur Zugbeanspruchung aufnehmen können und keine Druck- und Biegesteifigkeit haben. Dadurch kann der Seilnetzmantel eines Seilnetz Kühl- turms eine sehr hohe Werkstoffausnutzung aufweisen und infolgedessen zeichnet er sich besonders durch sein geringes Eigengewicht und seine Anpassungs- fähigkeit an die erwünschte Form des Rotations- mantels aus. Der Vorteil des demzufolge mit Seilen erreichbaren geringen Konstruktionsgewichts geht jedoch teilweise wieder dadurch verloren, daß man sehr massive Fundamente und Druckglieder anordnen muß.

Ein Seilnetz Kühlurm erwirbt seine Steifigkeit erst nach der Vorspannung. Ein dauernder Zugspannungszu- stand kennzeichnet die Mantelfläche dieser Art von Konstruktionen. Deshalb hat der Seilnetzmantel keine Stabilitäts- bzw. Beulprobleme. Instabilitäts- erscheinungen im Netzbereich sind nicht möglich.

Die Geometrie der Seilnetz Kühltürme hängt in großem Maße vom Vorspannungszustand ab. Sie kann nicht vorab festgelegt werden, sondern muß im Laufe des Formfindungsprozesses entwickelt werden. Diese Formfindung spielt die wichtigste Rolle beim Entwurf einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion und ist eine Besonderheit dieser Konstruktionsart.

Aufgrund der gegenüber massiven Stahlbetontürmen vergleichsweise geringen Steifigkeit treten unter Windbelastung in den Seilnetzühltürmen große Verformungen auf, die nach der vorliegenden Arbeit für Lastannahmen nach DIN 1050 bis zu 12 m betragen können. Darüberhinaus besteht eine starke geometrisch-nichtlineare Abhängigkeit zwischen Belastung und Verformung. Die dehnungslosen Verschiebungen rufen den größten Anteil der Verformungen hervor. Das Gleichgewicht muß deshalb am deformierten System gesucht werden, so daß das Superpositionsgesetz nicht mehr gilt.

Außerdem haben die Erfahrungen der Ausführung der Seilnetztragwerke eindeutig gezeigt, daß insbesondere bei dieser Bauweise die Maßgenauigkeit das zentrale Problem bildet. Die exakte Vorgabe der Abmessungen jedes einzelnen Bauteils und ihre ebenso genaue Realisierung sind die Grundvoraussetzungen für das Gelingen eines vorgespannten Seilnetzkühlturms (2.6). Die Problematik der Seilnetzmaschenwerke beruht also auf der Tatsache, daß der für die Tragfähigkeit einer solchen Konstruktion maßgebliche Spannungszustand äußerst empfindlich gegen kleinste Änderungen der Geometrie ist.

Zuletzt verleiht der Vorspannungszustand der Konstruktion eine zusätzliche nichtlineare geometrische Steifigkeit, die eine Funktion der vorhandenen Vorspannung und der augenblicklichen deformierten Geometrie ist.

1.3 Maßgebende Parameter

Die Konstruktion eines Seilnetzkühlturms ist von einer Reihe von Parametern abhängig, die sein Tragverhalten entscheidend beeinflussen. Diese Systemgrößen lassen sich aus den folgenden Bauelementen des Tragwerkes entwickeln:

- 1) dem Seilnetz selbst, für das verschiedene Maschenarten infrage kommen (1.2.4),
- 2) dem oberen Speichenrad und den Versteifungsringen, die aus Speichenseilen und Druckringen bestehen,
- 3) dem Pylon und dem Ringfundament.

Daraus ergeben sich hinsichtlich der inneren Geometrie die Systemparameter:

Größe der Vorspannung,
Maschenart und Seilführung,
Maschenweite über den Umfang,
Neigung der Diagonalseile,
Querschnittsverhältnis der verschiedenen Seilscharen,
Randbedingungen am oberen und unteren Rand.

Daraufhin ergeben sich hinsichtlich der Ringaufsteifungen die Systemparameter:

Höhenlage eines Speichenrades,
Steifigkeit eines Speichenrades,
Anzahl der Speichenräder,
Steifigkeit des oberen Speichenrad.

Außerdem ergeben sich hinsichtlich der Kühlturm-
geometrie die Systemparameter:

ausgewählter Verlauf der Meridiankurve,
das negative GAUß'sche Krümmungsmaß,
Tailllenlage über die Höhe,
Schlankheit des Kühlturmes.

1.4 Ziel eigener Untersuchung

Wenn man die verschiedenen Variationsmöglichkeiten der oben genannten Parameter betrachtet, so ergibt sich eine nahezu unbegrenzte Zahl von Varianten, aus denen der optimale Seilnetz-kühlturm ausgewählt werden muß. Die Wahl der optimalen Kriterien dafür ist dem Tragverhalten anzupassen. Das statische und dynamische Tragverhalten in Abhängigkeit von den oben genannten Parametern ist noch zu erklären und zu vervollständigen. In der Literatur ist keine parametrische Untersuchung über die Einflüsse dieser Parameter auf die Seilkräfte und Systemverschiebungen bekannt. Diese umfangreichen Untersuchungen sind dagegen für die Minimierung des erforderlichen Materialbedarfs und für die kritische Bewertung der Wirtschaftlichkeitsüberlegungen von größter Wichtigkeit. Dabei stellt sich als Kernproblem die Parameterfülle dar, die aus rechentechnischen Gründen eine ausschöpfende Bearbeitung nahezu unmöglich macht. Das Ziel dieser Arbeit wurde deshalb auf die Durchführung von numerischen Untersuchungen beschränkt, die den Einfluß einiger Parameter auf das statische Verhalten eines Kühlturmprototypes mit 230 m Höhe erläutern. Der Vorspannungszustand bzw. Vorspannungsgrad soll dabei eine besondere Beachtung erfahren.

Die Variation von Höhenlage, Steifigkeit und Anzahl der Speichenräder bildet dabei einen der Schwerpunkte dieser Arbeit. Es stellt sich heraus, welche der untersuchten Größen von besonderer Bedeutung sind. Daraus lassen sich Kriterien ableiten, die für die Dimensionierung wichtig sind. Außerdem wird der Einfluß der geometrischen Nichtlinearität der Seilnetzkühltürme an Hand von Beispielen untersucht.

2. Stand der Technik

2.1 Übersicht

Über die Kriterien für die Wahl des ersten 1977 fertiggestellten Seilnetz-Trockenkühlturms der Welt wurde in /33/ eingegangen. Über die Wahl des Standorts Schmehausen ist in /48/ berichtet. Die Entwurfsüberlegungen, die charakteristischen Eigenschaften und das Tragverhalten dieses neuartigen Kühlturms sind in /69, 70, 71/ ausführlich behandelt worden. Die Konstruktive Durchbildung, die Montagevorgänge und die im Laufe der Bearbeitung vorgenommenen Änderungen sowie die das Tragverhalten weiter verdeutlichenden Ergebnisse der statischen Berechnung sind in /72/ beschrieben. Verschiedene Konstruktive Lösungen und Ausführungstechniken haben sich während des Bauens, wie bei jedem Prototyp, als technisch und wirtschaftlich verbesserungsfähig /19/ herausgestellt. Die Photogrammetrische Vermessung dieses Kühlturms und die anschließende Formkontrolle ist in /13/ dargestellt. Über sein Betriebsverhalten liegen hingegen noch keine Erfahrungen vor, da der zugehörige Thorium-Hochtemperatur-Reaktor voraussichtlich erst im Jahre 1980 den Betrieb aufnehmen wird. Über Seile und Seilverbindungselemente solcher vorgespannten Seilkonstruktionen und ihrer Handhabung ist in /54, 88/ berichtet.

Eine unabhängige Konzeption über vorgespannte Seilnetz Kühltürme ist in /15, 16, 34/ erläutert. Dabei wird zu den sich ergebenden Problemen der Bauwerksaerodynamik der statischen Berechnung, der konstruktiven Ausbildung und Beplankung des Seilnetzes sowie der Montage Stellung genommen. Auf thermodynamische Einzelheiten ist in /15/ eingegangen.

Die vorgespannten Seilnetz Kühltürme gehören zu der Kategorie zugbeanspruchter Konstruktionen /27, 36, 39, 62, 63, 64, 92/. Diese Konstruktionen wurden erst in den letzten Jahrzehnten in der Baupraxis zunehmend verwendet /62, 63, 92/. Die Voraussetzungen dafür waren Fortschritte in der Entwicklung von Stählen hoher Zugfestigkeit und in der Bereitstellung geeigneter numerischer Methoden zur wirklichkeitsnahen Berechnung. Über rotationsförmige Membranen und Seilnetze, wie Hyperboloide und Katenoide, ist in /62, 63/ berichtet. Die Variation der Kopfausbildung dieser Rotationsstrukturen als Speichenrad ist in /65/ erwähnt. Der Gedanke von Seilverspannten Druckstäben ist in /68/ dargestellt. Ein großer Anstoß auf dem Gebiet der Netzstrukturen wurde in den Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL) an der Universität Stuttgart gegeben. Eine konkrete Behandlung verschiedener Probleme dieser Konstruktionen ist in der Schriften-

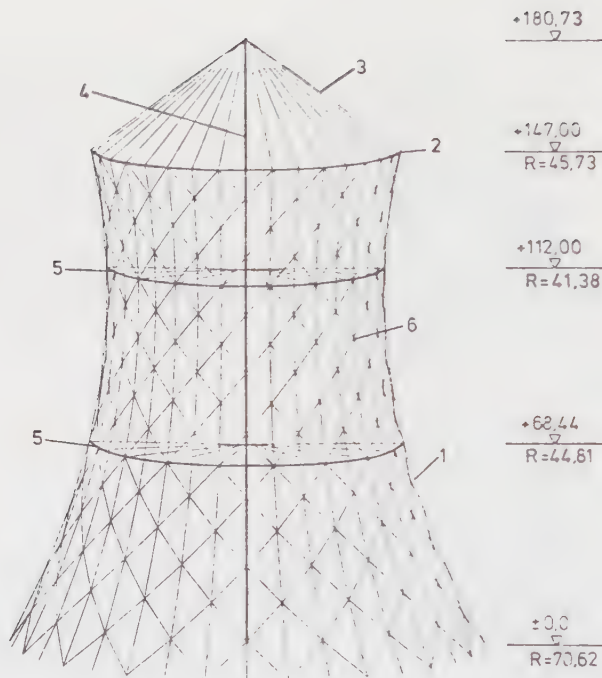
reihe weitgespannter Flächentragwerke des Sonderforschungsbereiches (SFB 64) an der Universität Stuttgart erschienen. Die Berichte des Instituts für Statik und Dynamik (ISD) der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart haben die Seilnetze von mathematischer Seite her bearbeitet. Dennoch fehlen immer noch Erkenntnisse über das statische und dynamische Verhalten von Seilnetzkonstruktionen.

2.2 Konstruktionsprinzip

Die Bilder 4,5 und 6 zeigen die Hauptkonstruktionselemente des Seilnetzkühlturms Schmehausen, wobei das Bild 4 die Haupttragelemente erkennen läßt und die Bilder 5 und 6 die Ausbildung eines Netzknotens und den Anschluß der Verkleidung darstellen.

In der Mitte eines Seilnetzkühlturms steht ein Zentralmast, an dessen Spitze ein Druckring an radial angeordneten Speichenseilen hängt. Zwischen diesen oberen Randglied und dem Ringfundament ist ein Rotationsseilnetz gespannt. Das Seilnetz ist ein Maschenwerk, für das verschiedene Maschenarten (1.2.4) infrage kommen. Es erhält seine Steifigkeit erst, wenn ihm ein dauernder Zugspannungszustand eingeprägt ist. Zur Aufnahme der Zugspannungen im Boden ist das Ringfundament an Bodenankern befestigt. Bei Seilnetzkühltürmen erheblicher Abmessungen sind zur Aussteifung des Seilnetzmantels gezielte Speicherräder auf verschiedenen Ebenen einzugliedern.

Für Korrosionsschutz sind die Einzeldrähte der Seile



**Bild 4: Konstruktionsprinzip Seilnetz -
kühlturm Schmehausen**

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1) Seilnetzmantel | 2) Druckring |
| 3) Speichenseile | 4) Mast |
| 5) Speichenrand | 6) Netzknoten |

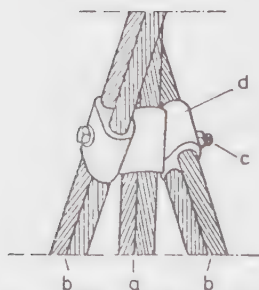


Bild 5: Ausbildung eines Netzknotens

- a) Meridiānsell (2 Litzen $\varnothing 25$ mm)
b) Schrägseil (2 Litzen $\varnothing 20$ mm)
c) Verbindungsschraube $\varnothing 16$ mm
d) Alupreßklemmen (Gleitlast 4 Mp)

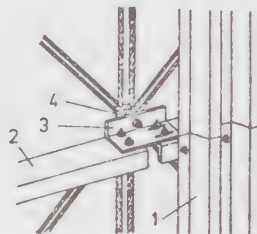


Bild 6: Anschluß der Verkleidung

- 1) Alutrapezblech 1mm stark
2) Aluwandträger
3) Aluanschluffteil
4) Seilnetzknoten

mit einer Aluminiumbeschichtung größer Stärke überzogen. Jedes Netzseil besteht aus zwei parallel laufenden Litzen, die im Herstellwerk im Abstand der Knotenpunkte mit aufgepreßten Aluminiumklemmen versehen sind. Die Anwendung von Doppellitzen ist vorteilhaft, weil sie die präzise Einhaltung des vorgesehenen Knotenabstandes bei der Konfektionierung auf einer optisch gesteuerten Pressenstraße und die Realisierung eines frei drehbaren Knotens gewährleisten. Für jeden Netzknoten ist an der Baustelle lediglich eine Schraube (Bild 2) zur Knüpfung der Klemmen der sich kreuzenden Seilscharen erforderlich.

Für die Befestigung der Aluverkleidung (Bild 3) sind Aluwandträger über ein Aluanschlussteil am Netzknoten angeschlossen. Ausreichende Beweglichkeit zwischen ihr und dem Seilnetz erfolgt durch die Anordnung von Langlöchern in Riegeln und Blechen. Der über die Höhe veränderliche Umfang des Mantels wird gegenüber Trapezblechrändern mittels huttförmiger Zwickelbleche ausgeglichen, die gleichzeitig die Dehnungsunterschiede in Umfangsrichtung aufnehmen. Außer Aluminiumblechen käme als Verkleidung Wellasbestzement, glasfaserverstärkter Kunststoff oder PVC-beschichtetes Polyestergewebe in Frage.

2.3 Maschenarten und Seilführung

Wenn man die verschiedenen Variationsmöglichkeiten des Seilnetzmaschenwerks im Hinblick auf die Forderung nach einer gegensinnigen Krümmung verschiedener Seilscharen zur Vorspannbarkeit betrachtet, so ergeben sich hauptsächlich die viereckigen



Bild 7: Viereckige Maschen



Bild 8: Seilumlenkung gegen Druckringe



Bild 9: Dreieckige Ring - maschen

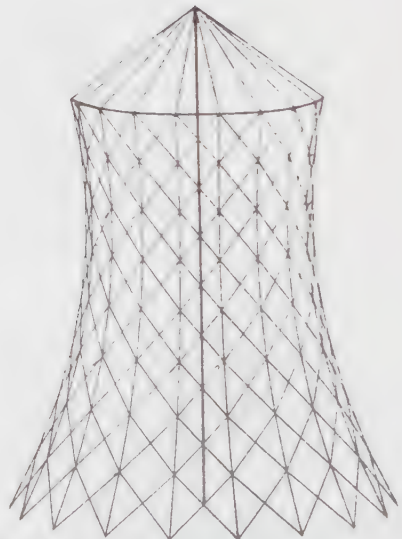


Bild 10: Dreieckige Meridian - maschen

Maschen, die dreieckigen Ringmaschen und die dreieckigen Meridianmaschen.

Die viereckigen Maschen (Bild 7) haben nur zwei Seilscharen, eine in Richtung der Breitenkreise verlaufende Ringseilschar und eine Meridianseilschar. Die Seile laufen dabei in Richtung der Hauptkrümmungen und bilden ein orthogonales Liniennetz. Die Forderung nach einer gegensinnigen Krümmung ist hier am deutlichsten eingepreßt. Diese Art der Seilführung hat den Vorteil, die Hauptkrümmungen der antiklastischen Rotationsmantelfläche auszunutzen. Damit ist der Kräftekreislauf in Ringrichtung geschlossen. Sie hat aber den Nachteil, ohne dehnungslose Maschenwinkeländerungen nur Kräfte in Richtung ihrer beiden Seilscharen übertragen zu können. Ihr Tragverhalten weicht dadurch bei kleinen Verformungen von dem einer Membranschale ab. Dies bedingt eine Abspannung des Pylons oder des Druckringes, für die verschiedene Möglichkeiten sich ergeben, auf die in /16/ und /34/ ausführlich eingegangen ist. Ein Beispiel dieser Netzausbildung ist auch in /15/ dargestellt. Hier wird gezeigt, daß es günstig ist, der Turmkontur eine Taille zu geben. Solche Maschenwerke sind in der Natur vorgegeben, wie zum Beispiel bei den Spinnennetzen.

Die dreieckigen Ringmaschen (Bild 9) haben eine Ringseilschar und zwei an der Mantelfläche negativ verlaufende Diagonalseilscharen. Im Gegensatz dazu haben die dreieckigen Meridianmaschen (Bild 10) eine Meridianseilschar und zwei an der Mantelfläche positiv verlaufende Diagonalseilscharen. Dies ist bedingt, wie oben erwähnt, durch die Forderung nach einer gegensinnigen Krümmung der Schrägseile gegen-

über der Ring- und Meridianseile zur Vorspannbarkeit des Netzes. Diese beiden Arten der dreieckigen Maschen nähern sich, im Bereich der Theorie 1.Ordnung, hinsichtlich des Tragverhaltens der Membranschale. In den beiden Arten sind die Maschenweiten über den Umfang konstant und über die Höhe veränderlich. Demzufolge sind die Ringseile bei dreieckigen Ringmaschen voneinander unterschiedlich und die Meridianseile bei dreieckigen Meridianmaschen untereinander exakt gleich.

Andere Maschenarten und Seilführungsmöglichkeiten, die keine gegensinnige gekrümmten Seilscharen aufweisen, sind ohne Bedeutung für praktische Zwecke und unbrauchbar. Verspannungen, der an der Mantelfläche positiv verlaufenden Schrägseilscharen gegen Druckringe (Bild 8), stellen eine sehr große Abweichung vom Zweck der vorgespannten Seilnetzkonstruktionen dar und nutzen die Eigenschaften der antiklastisch gekrümmten Fläche nicht aus. Ein Seilnetzmantel, der nur aus den geraden Erzeugenden eines Hyperboloids gebildet ist, stellt ein sehr weiches System dar, da dessen Knoten äußere Querlasten erst durch große Verschiebungen aufnehmen können. Ähnlich verhält sich ein sechseckiges Maschennetz.

2.4 Bauablauf und Ausführung

Bild 11 zeigt den Montagevorgang des SeilnetzKühlturms Schmehausen. Der Mast wird vorab in Gleitbauweise und gleichzeitig mit dem Ringfundament aus Stahlbeton hergestellt. Danach werden am Boden der Druckring und um den Mast ein Hubring

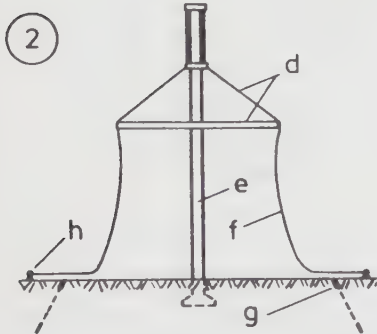
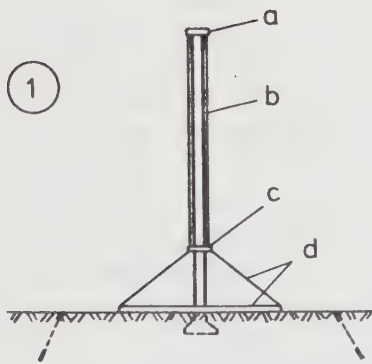


Bild 11 : Montageablauf in Schmehausen

- | | |
|------------------|----------------|
| a) Hubgerät | b) Hubstangen |
| c) Hubring | d) Speichenrad |
| e) Mast | f) Seilnetz |
| g) Ringfundament | h) Haspeln |

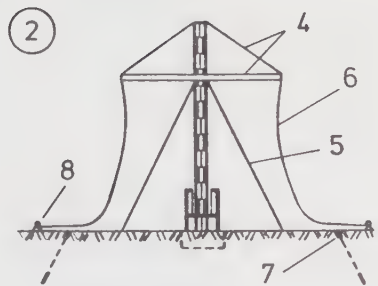
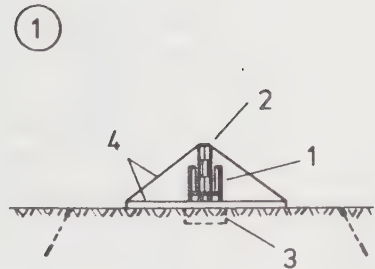


Bild 12 : Montagevorschlag nach Krupp

- | | |
|------------------|----------------|
| 1) Hubgerät | 2) Mastschüsse |
| 3) Mastfundament | 4) Speichenrad |
| 5) Abspannseile | 6) Seilnetz |
| 7) Ringfundament | 8) Haspeln |

aus vorgefertigten stählernen Segmenten zusammengebaut. Zwischen diesen beiden Ringen werden die Speichen eingebaut. Mit Hilfe einer am Mastkopf montierten hydraulischen Hubvorrichtung wird der Hubring mittels Hubstangen gehoben. Mit Beginn des Hebens des Druckrings werden die Netzseile angeschlossen und während des Hubvorganges kontinuierlich direkt von Haspeln abgerollt und zusammengesteckt. Nach dem Erreichen der Hubendlage werden sie in den Fundamentring eingehängt. Danach wird die Hubvorrichtung am Mastkopf zur Spannvorrichtung verstärkt und damit das Seilnetz mit der planmäßigen Vorspannung versehen. Über seinen Zuschnitt stellt sich dabei die geforderte Form ein. Danach wird der Hubring mit dem Mastkopf kraftschlüssig verbunden. Zur Aufnahme der Windbelastung in der Montagezeit wird der Mast abgespannt.

Bild 12 veranschaulicht einen Vorschlag nach /16/ zur Montage von kleineren Seilnetz Kühltürmen mit einem Mittelmast aus Stahl. Das hydraulische Hubgerät ist im Gegensatz zum vorigen Verfahren nicht auf der Mastspitze sondern auf dem Mastfundament installiert. Der Mast besteht aus einzelnen Mastschüssen, die von unten nach oben fortschreitend hochgedrückt werden. Während des Hubvorganges werden sie verschraubt oder verschweißt und das gesamte Seilnetz, wie oben beschrieben, wird hergestellt. Die Abspannseile werden dabei mitgeführt.

2.5 Montage der Beplankung

Bild 13 zeigt die Montagevorrichtungen der Beplankung des Seilnetz Kühlturms Schmehausen. Die

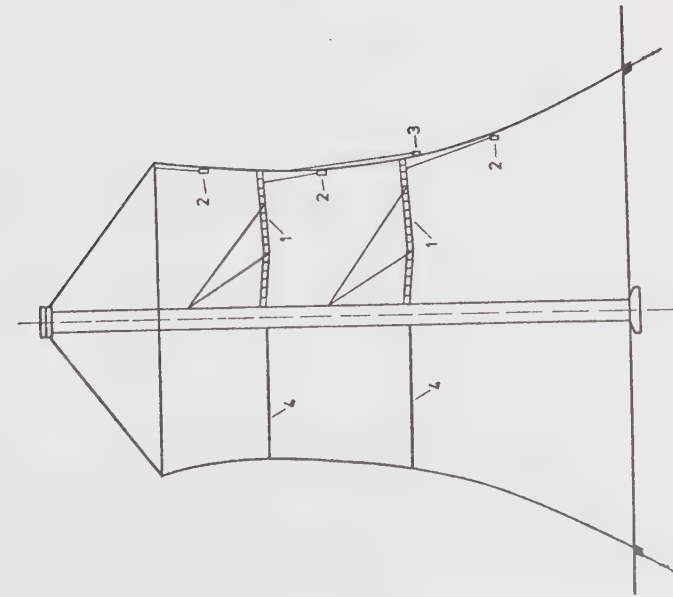


Bild 13 Montage der Beplankung mittels
Befahranlagen
1) Laufstege 2) Innenbefahranlagen
3) Außenbefahranlagen 4) Speichen

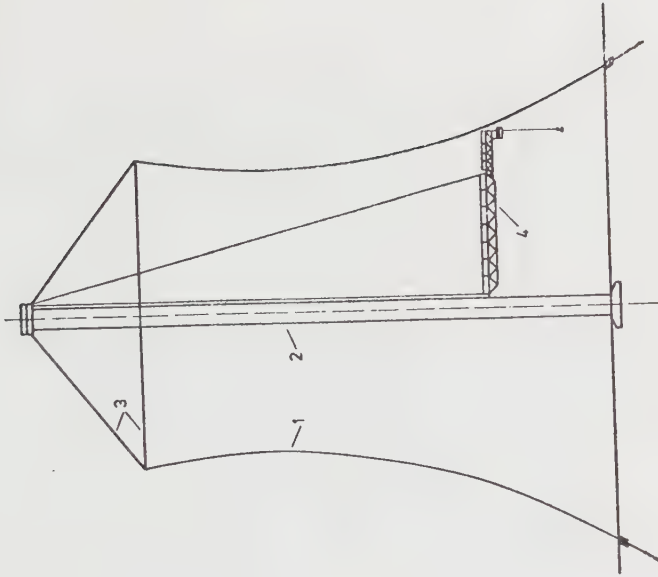


Bild 14 Montage der Beplankung mittels
Teleskopkran
1) Mast 2) Seilnetz 3) Speichenrad
4) Teleskopkran

Aluminiumverkleidung aus Trapezblech wird mit Hilfe von Befahranlagen montiert. Die Montagebühnen sind in vertikaler Richtung durch gespannte Seile und in Ringrichtung durch die an den Außenringen der Speichenräder befestigten Ringschienen geführt. Sie passen sich damit der Form des Mantels an.

Bild 14 zeigt die ursprünglich geplante Ausführung der Beplankung mit noch nicht vorgesehener Aussteifung des Seilnetzkühlturms durch Speichenräder. Die Verkleidung wird dabei von einem am Mast vertikal und im Kreis beweglichen Teleskopausleger aus an das Seilnetz angebracht. Der Vorteil dieses drehbaren Teleskopkranes liegt in der räumlichen Bewegung, durch die er jede beliebige Stelle des Mantels von innen her schnell erreichen kann.

Die Anordnung der Verkleidungselemente auf der Innenseite des Seilnetzes erleichtert ihre Montage erheblich. Außerdem erhöht diese Anordnung den Rauigkeitsbeiwert der Kühlturmoberfläche und baut damit die unangenehmen hohen Sogspitzen an den Flanken des Kühlturms ab /59/. Die Montagevorgänge müssen so erfolgen, daß während der Montagezeit keine unzulässig hohen Windbelastungen des Kühlturms auftreten.

2.6 Maßgenauigkeit

Die Ansprüche der Maßgenauigkeit an die Seilnetzkühltürme hinsichtlich der Fertigung und Montage aller Bauteile liegen sehr hoch. Solche Konstruktionen müssen ihren planmäßigen Vorspannungszustand aufweisen. Bereits sehr kleine Herstellungsfehler,

die die Geometrie betreffen, bedeuten Dehnungsfehler und damit Vorspannungsfehler, die zu Über- oder Unterspannungen und unkontrollierbaren Umlagerung der Seilkräfte führen können. Schon kleine Längenfehler von nur $\pm 0,1 \%$ bewirken einen Vorspannungsfehler von

$$\Delta V = \varepsilon \cdot E = \pm 0,001 \cdot 16,2 \cdot 10^2 = \pm 1,62 \text{ Mp/cm}^2,$$

was nahezu 50 % der üblichen Vorspannung ausmacht. Um die Schwankung der Vorspannungskräfte um $\pm 10 \%$ sicherzustellen, ist es notwendig, die Längenfehler auf

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{E} = \frac{1,62 \cdot 10}{16,2 \cdot 10^2 \cdot 50} = 0,02 \%$$

zu begrenzen.

Deshalb verlangten in Schmehausen der Bauherr und der Prüffingenieur einen Vergleich der tatsächlichen Vorspannung mit der rechnerischen Fertigstellung des Kühlturms ohne Beplankung. Mit einem Seilkraft-Meßgerät konnte eine solche Messung der Kräfte bei der Vielzahl von Elementen nur stichprobenartig erfolgen. Eine Aussage, die 650 ausgeglichene Netzknoten umfaßte, erfolgte mit photogrammetrischer Vermessung /13/ der Geometrie. Dazu wurde ein Festpunktfeld rund um den Kühlturm angelegt. Man brachte 40 signalisierte Paßpunkte in vier Ebenen am Seilnetz an und bestimmte deren räumliche Koordinaten in Bezug auf das Festpunktfeld. Ausgehend von genau eingemessenen Kammerstandpunkten innerhalb des Kühlturms wurden anschließend photographische Aufnahmen der auszuwertenden 4 Netzausschnitte mit insgesamt 16 Meridianseilen gemacht. Die simultane Berechnung der Orientierungen der Konvergentaufnahmen und der räumlichen Koordinaten aller erfaßten Knoten wurde mit Hilfe eines Rechenprogramms ausgeführt. Der

mittlere Koordinatenfehler lag im Durchschnitt bei $\pm 1,2$ cm. Die ermittelten Koordinaten der Netzknoten beschreiben die Form des betreffenden Meridianseils in digitaler Weise. Sie werden weiterverarbeitet und ein funktionaler Zusammenhang ermittelt, der die Meridianseilkurve bestimmt. Die Stichtoleranzen zwischen Ist- und Sollform betrug dabei maximal 3 cm. Das Meßverfahren hat eine hohe formtreue Ausführungsgenauigkeit bestätigt. Nicht erfassen konnte es aber eventuell vorhandene örtliche Abweichungen, wie z.B. geringe Beulen im Netz.

2.7 Statische Berechnung

Bei der statischen Berechnung von Seilnetzkonstruktionen gibt es zwei Vorgehensweisen: die diskrete und die kontinuierliche Modellierung /35, 63, 87, 91/. Das diskrete Vorgehen entspricht der Natur dieser Strukturen, weil ein Seilnetz in sich selbst aus sogenannten finiten Elementen zusammengesetzt ist. Die finiten Elementmethoden werden deshalb in letzter Zeit für die Berechnung der Seilstrukturen bevorzugt. Das Seiltragwerk wird durch seine Seilelemente repräsentiert, die an den Knotenpunkten miteinander verknüpft sind. Deswegen ist hier eine kontinuierliche Abbildung der diskreten Struktur nur eine Näherung. Das diskrete Vorgehen hat auch größere Anwendungsgebiete, da es für Seilnetzwerke mit komplexer Form, wie verzweigte dreidimensionale Seilnetzkonstruktionen, und unregelmäßiger Beanspruchungen geeignet ist. Durch das diskrete Vorgehen erhält man im statischen Fall algebraische Systemgleichungen und im dynamischen Fall ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen.

Die kontinuierliche Idealisierung der Seilnetzstruktur ist nur eine Näherung und Vereinfachung. Diese Vorgehensweise ist nur beschränkt geeignet bei glatter Geometrie, gleichmäßig verteilter Belastung und einfachen Randbedingungen. Sie liefert ein gewöhnliches bzw. partielles Differentialgleichungssystem.

Die theoretischen Grundlagen zur statischen Berechnung von Seilnetzwerken werden in / 63, 73, 87/ angegeben. Das diskrete Vorgehen für die Formulierung beliebiger Seilnetzwerke ist in /91/ benutzt. Einmal wird dabei das Randwertproblem zunächst in ein Anfangswertproblem mit einer von der Belastung abhängigen Variable umformuliert und dann numerisch integriert. Zum anderen wird die Last-Inkrement-Methode benutzt, wobei weniger Rechenzeit benötigt und mit Hilfe einer **feinen Segmentierung** der Belastungen die Divergenz bei der Gleichgewichtsiteration vermieden wird. Die **NEWTON-RAPHSON**-Methode wird in /8/ für die wirkungsvollste Lösungsmethode zur Berechnung von stark nichtlinearen Zugbeanspruchten Seilnetzwerken gehalten. Mit der Finite-Element-Methode liegt in /4/ ein ausführlicher Beitrag über die statische Berechnung von vorgespannten Netzwerken vor. Die Theorie der finiten Elemente wurde 1953 von ARGYRIS /2, 3, 4, 5, 6 / aufgestellt und ständig weiterentwickelt. Diese Methode wurde ursprünglich nur in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Dann wurde sie in Verbindung mit der Matrizen-Verschiebungsmethode fast in allen Gebieten der Technik zur statischen /4/ und dynamischen Berechnung

von Tragwerken bzw. Seiltragwerke /4/ herangezogen. Die Matrizen-Verschiebungsmethode ist einfacher zu programmieren und zu automatisieren als beispielsweise die Matrizen-Kraftmethode. Bei der vorliegenden Arbeit hat sich vorteilhaft die Theorie Mechanischer Systeme (MeSy) erwiesen.

3. Zur Theorie Mechanischer Systeme (MeSy)

3.1 Entwicklung und Übersicht

Die seit 1966 von SCHRADER aufgestellte [77,78,79] und ständig weiterentwickelte [81,82,83,84,85,86] Theorie der Mechanischen Systeme (MeSy) erfüllt sämtliche Voraussetzungen für die statische und dynamische Analyse von nichtlinearen Netzkonstruktionen. Sie ist deshalb bei der vorliegenden Arbeit angewendet worden. MeSy wurde, ausgehend von der klassischen Analytischen Mechanik [24,49], auf deformierbare Systeme erweitert. Voraussetzung dafür ist, daß sich das System in finite Elemente diskretisieren und idealisieren läßt, deren Randwertprobleme gelöst sind. MeSy ist dann eine analytische Theorie des Elementverfahrens für allgemeine Probleme mechanischer Systeme. Sie unterscheidet sich von den üblichen finiten Elementverfahren sowohl in ihrer theoretischen Begründung als auch in ihrem Anwendungsspektrum. Bei ihrer praktischen Anwendung auf Seilnetzkühltürme wie z. B. im Rahmen der vorliegenden Arbeit können mit verhältnismäßig geringem Aufwand und großer Genauigkeit inhaltsreiche Untersuchungen durchgeführt werden. Um den theoretischen Hintergrund dieser Untersuchungen verständlich zu machen, erscheint es hier sinnvoll, im folgenden die Theorie MeSy insbesondere im Hinblick auf die geometrische Nichtlinearität großer Verschiebungen darzustellen. Dieses Problem entspricht den durchgeführten Untersuchungen.

3.2 Verschiebungsvektoren in LAGRANGEScher Beschreibung

Nach der Analytischen Mechanik ist der Radiusvektor $\mathbf{r}$ eines Systempunktes P (Bild 15) bei Annahme eines starren Körpers im Inertialraum zu einem Zeitpunkt t eine Funktion der Systemkoordinaten q_v , die die geometrische Konfiguration des Systems vollständig kinematisch beschreiben. Sie

sind, als unbekannte Zustandsvariable, üblicherweise voneinander unabhängige Verschiebungs- und Verdrehungsgrößen. Die Anzahl N dieser allgemeinen Koordinaten q_v bezeichnet die Dimension der Freiheitsgrade des Systems. Es gilt

$$r_p(t) = r_p(q_v(t), t). \quad (1)$$

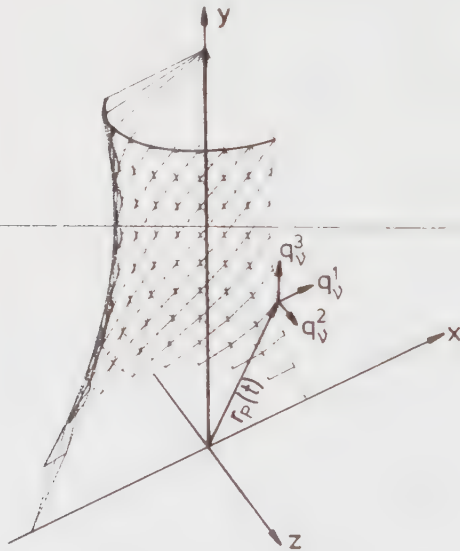


Bild 15: Beschreibung der Kinematik durch Systemkoordinaten q_v

Einen Übergang zu deformierbaren Systemen erfolgt durch die Anordnung von Elementkoordinaten u_k , die in einem elementfesten Bezugssystem definiert und voneinander unabhängig sind. Sie sind ausgezeichnete, diskrete Größen, die die Randbedingungen des Elementes erfüllen. Sie beschreiben nur die Verformungen der Elemente. Damit ist das Problem der Starrkörperverschiebungen bei statischen Untersuchungen eliminiert.

Zwischen diesen beiden generalisierten Element- und Systemkoordinaten besteht die aus der geometrischen Kontinuität folgende, kinematische Beziehung

$$u_k = u_k(q_v). \quad (2)$$

Damit lassen sich die Randkoordinaten auf Funktionen von Systemkoordinaten zurückführen. Sie stellen im mathematischen Sinne überzählige Unbekannte dar, die durch die funktionale Abhängigkeit (2) eliminiert werden müssen.

Diesen zwei miteinander gekoppelten Koordinatenräumen kommt in der Theorie MeSy eine besondere Bedeutung zu. Mit ihnen wird der Radiusvektor eines deformierbaren Systems, im Unterschied zum klassischen Ansatz (1), jetzt durch die Funktion

$$\mathbf{r}_p(t) = \mathbf{r}_p(\mathbf{a}_p, q_v(t), u_k(q_v(t), t), t), t) \quad (3)$$

beschrieben, wobei $\mathbf{a}_p$ ein Referenzvektor ist.

Ausgehend von einem ebenfalls raumfesten Anfangszustand $\mathbf{r}_p(0)$ ist nun der Verschiebungsvektor in LAGRANGEScher Beschreibung durch

$$\mathbf{w}_p(t) = \mathbf{r}_p(t) - \mathbf{r}_p(0) \quad (4)$$

gegeben. Die Zeit kann hier sowohl in $\mathbf{r}_p$ als auch in u_k explizit vorkommen. Solche Systeme sind rheonom. Fehlt diese Zeitabhängigkeit, sind die Systeme skleronom. Für sie ist der Begriff der virtuellen Verschiebungen von großer Bedeutung.

3.3 Die virtuellen Verschiebungen und Transformationskoeffizienten

Bei einem deformierbaren Mechanischen System haben die virtuellen Verschiebungen Elementverformungen zur Folge. Sie stellen im Sinne der Variationsrechnung eine variierte Lage dar, die mit der geometrischen Konfiguration des Systems vereinbar ist. Sie sind geometrisch und physikalisch mögliche, gedachte Verrückungen, die man sich zeitunabhängig vorzustellen hat. Sie ergeben sich aus dem Ansatz (3), der eine N-dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit darstellt, durch die partielle Ableitung des Ortsvektors $\mathbf{r}_p$ nach q_v

$$\delta \mathbf{r} = \delta \mathbf{w} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q_v} \delta q_v + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial u_k} \delta u_k, \quad (4)$$

wobei δu_k aus der kinematischen Beziehung (2) folgt:

$$\delta u_k = \frac{\partial u_k}{\partial q_v} \delta q_v. \quad (5)$$

In den Gleichungen (4) und (5) entfallen also die Anteile der partiellen Ableitung nach der Zeit. Sie sind gewisse Beziehungen zwischen den virtuellen Verschiebungen des holonomen Systems und liefern die Transformationskoeffizienten zwischen den Koordinaten des Systems.

$$\mathbf{b}_{v,v} = \mathbf{w}_{,v} = \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial q_v} \quad (6)$$

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{w}_{,k} = \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial u_k} \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{kv} = \mathbf{u}_{k,v} = \frac{\partial u_k}{\partial q_v}. \quad (8)$$

Neben diesen Koeffizienten 1.Ordnung werden bei verschiedenen Problemen, zum Beispiel bei geometrisch nichtlinearen

Systemen, die Transformationskoeffizienten 2.Ordnung benötigen. Sie ergeben sich durch die partiellen Ableitungen von (6) und (8):

$$b_{\nu, \beta} = w_{, \nu \beta} \quad (9)$$

$$a_{k\nu, \beta} = u_{k\nu, \beta} \quad (10)$$

Diesen Koeffizienten kommt in der Theorie MeSy eine zentrale Bedeutung zu. Sie werden zum Formulieren der geometrisch nichtlinearen Systemgleichungen benötigt.

Die Gleichung (4) hat zwei Terme. Der erste Term stellt die virtuellen Starrkörperverschiebungen dar

$$St_{\delta w} = \frac{\partial w}{\partial q_{\nu}} \delta q_{\nu} = b_{\nu} \delta q_{\nu} \quad (11)$$

Der zweite Term erfaßt alle virtuellen Deformationen des finiten Elementes, die allein durch die Randkoordinate u_k beschrieben sind

$$D_{\delta w} = \frac{\partial w}{\partial u_k} \delta u_k \quad (11a)$$

Die Gleichung (5) läßt sich mit den Koeffizienten (8) als lineare Transformation ausdrücken

$$\delta u_k = a_{k\nu} \delta q_{\nu} \quad (12)$$

3.4 Systemgleichungen mit dem Prinzip von D'ALEMBERT in LAGRANGEScher Fassung

Nach dem Prinzip von D'ALEMBERT in LAGRANGEScher Fassung ist für ein aus N finiten Elementen bestehendes, in dynamischem Gleichgewicht befindliches, deformierbares System die Summe aller virtuellen Arbeiten der äußeren und inneren ein-geprägten Kräfte gleich der Summe aller virtuellen Arbeiten der Massenbeschleunigungen

$$\sum \delta A_a^{(e)} + \sum \delta A_i^{(e)} = \sum \delta A_{Mbs}. \quad (13)$$

Nach der Betrachtungsweise der Theorie MeSy separiert man die virtuellen Verschiebungen δ eines deformierbaren Mechanischen Systems in einen Teilzustand $\mathcal{D}\delta$, der die Deformationen angibt, und in einen Restverschiebungszustand $St\delta$, der die Starrkörperbewegung mißt

$$\delta = \mathcal{D}\delta + St\delta. \quad (14)$$

Damit nimmt das Prinzip (13) die Form

$$\sum St\delta A_a^{(e)} + \sum \mathcal{D}\delta A_a^{(e)} + \sum \mathcal{D}\delta A_i^{(e)} = \sum St\delta A_{Mbs} + \sum \mathcal{D}\delta A_{mbs} \quad (15)$$

an.

Das Prinzip gilt natürlich auch für jedes einzelne Element, das aus dem Systemverband herausgelöst ist, und für jeden virtuellen Verschiebungszustand. Hier muß man die virtuelle Arbeit aller in den Rändern wirkenden Spannungen $\delta A_s^{(e)}$ berücksichtigen. So erhält man für die virtuelle Verschiebungsva-riation, bei der das Element sich nur deformiert,

$$\mathcal{D}\delta A_a^{(e)} + \mathcal{D}\delta A_s^{(e)} + \mathcal{D}\delta A_i^{(e)} = \mathcal{D}\delta A_{Mbs}. \quad (16)$$

Setzt man (16) in (15) ein, so erhält man

$$\sum S_{j\alpha}^{t(e)} - \sum \mathbf{D}_{\delta A_{\delta}}^{(e)} = \sum S_{\delta A_{Mb\delta}}^{t(e)}. \quad (17)$$

Diese Gleichung drückt das fundamentale Prinzip für ein allgemeines finites Elementverfahren deformierbarer Systeme im Rahmen des Programmsystems MESY aus.

Setzt man in die Terme der Gleichung (17) die entsprechenden Größen ein, so erhält man

$$\mathbf{K}_j S_{j\alpha}^{t\omega_j} - \sum_{El.} S_j \delta u_j = \int_m d\ddot{\omega} S_{j\alpha}^{t\omega_j} = \sum_{El.} M_{\alpha} \delta q_v. \quad (18)$$

Dabei ist $\mathbf{K}_j$ die äußere eingeprägte Kraft und S_j die Randschnittlast. Unter Heranziehung von (11) und (12) ergibt sich daraus

$$\mathbf{K}_j \mathbf{b}_{j\alpha} - \sum_{El.} S_j a_{j\alpha} = \sum_{El.} M_{\alpha}. \quad (19)$$

Damit werden die Systemgleichungen zu dynamischen, im Sonderfall zu statischen Verträglichkeitsbedingungen.

Die konstitutive Randgrößenbeziehung der Elemente lautet

$$S_j = S_j(u_k, t). \quad (20)$$

In Verbindung mit der kinematischen Beziehung (2) wird

$$S_j = S_j(u_k(q_v), t). \quad (21)$$

Damit ergeben sich schließlich aus (19) die allgemeinen Systemgleichungen

$$\mathbf{K}_j \mathbf{b}_{j\alpha} - \sum_{El.} S_j(u_k(q_v), t) a_{j\alpha} = \sum_{El.} M_{\alpha}. \quad (22)$$

Abgekürzt:

$$P_{\alpha} - T_{\alpha} = M_{\alpha}. \quad (22a)$$

Die Vektoren K_j und die S_j werden durch den Basisvektor $b_{j\alpha}$ und die Transformationskoeffizienten $a_{j\alpha}$ auf Richtung α der generalisierten Koordinaten transformiert. P_{α} , T_{α} und M_{α} sind jeweils die generalisierten äußeren und inneren Lasten und Massenbeschleunigungen.

Da die virtuellen Verschiebungen δq_v voneinander linear unabhängig sind, erhalten wir als notwendige Gleichgewichtsbedingungen N Bewegungsgleichungen, nämlich für jeden Systemverschiebung eine Gleichung. Diese Gleichungen sind problemunabhängig auf der Ebene generalisierter Größen formuliert und werden deswegen als die allgemeinen Systemgleichungen bezeichnet. Für spezielle Problemklassen müssen sie weiter spezialisiert werden. Einige Beispiel für solche speziellen Systemgleichungen sind in [11,12,13] zu finden. Die allgemeinen Systemgleichungen sind auch koordinateninvariant und im allgemeinen in den Systemverschiebungen nichtlinear.

3.5 Linearisierung der Systemgleichungen bei geometrisch nichtlinearen statischen Problemen

Beschränkt man die Ausgangsgleichung (19) auf das statische Problem, so entfallen die generalisierten Massenkräfte ΣM_{α} und alle zeitabhängigen Glieder

$$K_j b_{jk} - \sum_{El.} S_j a_{jv} = Q_v = 0. \quad (23)$$

Die Glieder dieser Gleichung haben im allgemeinen einen transzendenten Charakter, weshalb die Gleichgewichtsbedingungen auch ein transzendentes Gleichungssystem darstellen. Sie lassen sich gewöhnlich nicht auf algebraische Gleichungen

gen zurückführen. Durch Linearisierung lassen sie sich jedoch für numerische Zwecke in algebraische Form umwandeln. Hierfür hat sich die NEWTON-RAPHSON-Methode als besonders brauchbar erwiesen [93]. Dabei wird die Beziehung $u_k = u_k(p_\alpha)$, durch eine TAYLOR-Reihe 1.Ordnung ersetzt, da p_α sich auf einen großen Verschiebungszustand, Theorie 3.Ordnung (Bild 16) bezieht

$$u_k(p_\alpha) = u_k(\overset{\circ}{q}_\beta) + q_\alpha \left. \frac{\partial u_k}{\partial p_\alpha} \right|_{\overset{\circ}{q}_\beta}. \quad (24)$$

Dieser mathematische Ansatz entspricht der mechanischen Auf-
führung des Verschiebungszustandes nach Gleichung (25) und
(26). Darin bezeichnet der erste Summand jeweils die Aus-
gangslage, der zweite die Nachbarlage (Bild 16)

$$p_\alpha = \overset{\circ}{q}_\alpha + q_\alpha \quad (25)$$

$$u_k = \overset{\circ}{v}_k + v_k. \quad (26)$$

Hierin wird

$$\overset{\circ}{v}_k = u_k(\overset{\circ}{q}_\beta)$$

und

$$v_k = q_\alpha \left. \frac{\partial u_k}{\partial q_\alpha} \right|_{\overset{\circ}{q}_\beta} = q_\alpha a_{k\beta}(\overset{\circ}{q}_j). \quad (27)$$

Diese Nachbarlage v_k entspricht vollkommen der Definition eines virtuellen Verschiebungszustandes

$$\delta u_k = \frac{\partial u_k}{\partial p_\alpha} \delta p_\alpha = a_{k\alpha} \delta p_\alpha. \quad (28)$$

Eine weitere Linearisierung im Sinne einer TAYLOR-Reihe führt zu:

$$\delta u_j|_{p_Y} = (a_{k\alpha}(\overset{\circ}{q}_Y) + q_\beta \left(\frac{\partial a_{j\alpha}}{\partial p_\beta} \right) \Big|_{\overset{\circ}{q}_\beta}) \delta q_\alpha \quad (29)$$

oder

$$\delta u_j|_{p_Y} = (a_{j\alpha} + a_{j\alpha, \beta} q_\beta) \Big|_{\overset{\circ}{q}_Y} \delta q_\alpha. \quad (29a)$$

Die Randschnittlasten lassen sich ebenfalls in eine TAYLOR-Reihe entwickeln:

$$S_j(u_k) = CE_{jk} v_k + \overset{\circ}{S}_j. \quad (30)$$

Mit

$$CE_{jk} = v_k \left(\frac{\partial S_j(u_\ell)}{\partial u_k} \right) \Big|_{\overset{\circ}{v}_\ell}. \quad (31)$$

CE_{jk} entspricht dem Elementsteifigkeitstensor. Hieraus folgt nach (27)

$$S_j(u_k) = CE_{jk} q_\alpha a_{k\alpha}(\overset{\circ}{q}_\beta) + \overset{\circ}{S}_j. \quad (32)$$

Bildet man analog zur Theorie 1.Ordnung (Bild 16), die Gleichgewichtsbedingungen in der Ausgangslage $\overset{\circ}{q}_Y$, und berechnet man die Schnittlasten aus einer Nachbarlage $\overset{\circ}{q}_Y + q_\alpha$, so erhält man aus (23) mit (32) die linearisierten Gleichungen 3./1.Ordnung (Bild 16)

$$K_j b_{j\alpha}(\overset{\circ}{q}_Y) - \Sigma \overset{\circ}{S}_{j\alpha}(\overset{\circ}{q}_Y) = (\Sigma (CE_{jk} a_{j\alpha} a_{k\beta}) \Big|_{\overset{\circ}{q}_\beta}) q_\beta. \quad (33)$$

Abgekürzt:

$$\overset{\circ}{P}_\alpha - \overset{\circ}{T}_\alpha = q_\beta \overset{1}{C}_{\alpha\beta}. \quad (34)$$

Die Systemsteifigkeitsmatrix ist die Summation des Anteils der elastischen Steifigkeit über alle Elemente

$$\overset{1}{C}_{\alpha\beta} = \Sigma CE_{jk} \cdot a_{j\alpha} \cdot a_{k\beta}. \quad (34a)$$

$$\overset{2}{C}_{\alpha\beta} = \overset{1}{C}_{\alpha\beta} + \sum_j \overset{0}{S}_j \cdot a_{j\alpha, \delta} \cdot \delta. \quad (36a)$$

Diese geometrische Steifigkeit läßt sich unter der Voraussetzung, daß nur konservative und auf die Knotenpunkte konzentrierte Kräfte angreifen, direkt aus der Veränderung der Gleichgewichtsbedingungen ableiten. Da der Systemsteifigkeitstensor $\overset{1}{C}_{\alpha\beta}$ durch kovariante Differentiation der Komponenten eines Tensors 1. Stufe entstanden ist, ist er selbst im Systemkoordinatenraum ein Tensor 2. Stufe. Seine Komponenten geben den bezogenen Widerstand an, der einer virtuellen Verschiebung entgegengesetzt wird und zwar infolge der in Richtung der Systemkoordinaten weisende Änderung der generalisierten Lasten.

3.6 Iteration und Konvergenz

Die Systemgleichung der Theorie 3.Ordnung (34) und (36) liefern Verschiebungszustände, die man üblicherweise in der Statik nach der Theorie 1. bzw. 2.Ordnung berechnet, mit dem Unterschied, daß hier nicht vom unverformten Nullzustand, sondern von einer bereits verformten Lage ausgegangen wird. Dabei führt der Näherungsansatz nach der Theorie 2.Ordnung auf das NEWTONsche Iterationsverfahren, wie schon SCHRADER [79] gezeigt hat. Die Lösung der Gleichungen erfolgt iterativ, indem man eine geeignete Ausgangslage $\overset{0}{q}_\alpha$ gemäß

$$\overset{0}{q}_\alpha := \overset{0}{\bar{q}}_\alpha + q_\alpha, \quad (37)$$

solange verbessert, bis die Verschiebungszuwächse q_α verschwinden oder bis die erwünschte Genauigkeitsgrenze der relativen Abfrage auf Iteration $\varepsilon_\alpha = q_\alpha / \overset{0}{q}_\alpha$ erreicht ist und $\overset{0}{q}_\alpha$ selbst eine Gleichgewichtslage wird. Die Bedingungen unter denen eine Gleichgewichtslage ergibt, wurde in

[79] formuliert. Ausgehend von MeSy wurden die Konvergenzeigenschaften in [14] ausführlich untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß der Algorithmus nach der Theorie 3./1.Ordnung ggf. linear, der Algorithmus nach Theorie 3./2.Ordnung dagegen ggf. quadratisch konvergiert und deshalb insbesondere für große Verschiebungen eine höhere Konvergenzgeschwindigkeit aufweist. Die Konvergenz nichtlinearer Probleme wurde auch in [38] behandelt. In den vorliegenden Untersuchungen schwankt die Anzahl der Iterationsschritte zwischen vier und zehn.

3.7 Kinematik des Seilelements

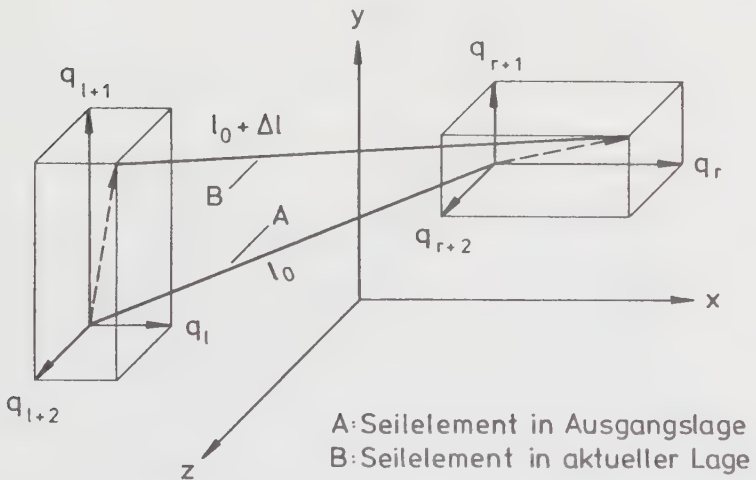


Bild 17: Kinematik des Seilelements

Die kinematische Einbindung eines beliebigen Seilelements läßt sich entsprechend Bild 17 darstellen und beschreiben.

Die Projektionen des Seilelements in den EUKLIDischen Anschauungsraum ergeben sich zu

$$\Delta x = x_n + q_n - x_\ell - q_\ell,$$

$$\Delta y = y_n + q_{n+1} - y_\ell - q_{\ell+1},$$

$$\Delta z = z_n + q_{n+2} - z_\ell - q_{\ell+2},$$

wobei der Index n bzw. ℓ die laufenden Nummer der Systemkoordinaten am rechten bzw. linken Knoten des Elements in x -Richtung ist. Die Indizierung in y - und z -Richtung erfolgt in der Reihenfolge. Die verformte Länge in der aktuellen Lage ist dann:

$$\ell = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}.$$

Hieraus folgt für die Randverschiebung:

$$u_1 = \Delta \ell = \ell - \ell_0,$$

wodurch das Seil nur gegen eine Dehnung Widerstand leistet und es statt einer Verkürzung durchhängt. In jedem Iterationsschritt gehen jeweils die von der augenblicklichen Systemkonfiguration vorgeschriebenen Werte aktuell ein. Durch weiteres Differenzieren der Transformationskoeffizienten 1.Ordnung

$$a_{kv} = \frac{\partial u_k}{\partial q_v}$$

ergeben sich hierzu die Transformationskoeffizienten 2.Ordnung

$$a_{kv,\beta} = \frac{\partial a_{kv}}{\partial q_\beta} = \frac{\partial^2 u_k}{\partial q_v \partial q_\beta}.$$

Sie werden von [30] übernommen und in folgender Tabelle zusammengestellt:

$a_{1\alpha}$	$a_{1\alpha, \beta}$						
	$\alpha \backslash \beta$	ℓ	$\ell+1$	$\ell+2$	r	$r+1$	$r+2$
$-\frac{\Delta x}{\ell}$	ℓ	H_1	$-H_4$	$-H_6$	H_1	H_4	H_6
$-\frac{\Delta y}{\ell}$	$\ell+1$		H_2	$-H_5$	H_4	H_2	H_5
$-\frac{\Delta z}{\ell}$	$\ell+2$			H_3	H_6	H_5	H_3
$-\frac{\Delta x}{\ell}$	r	Symmetrie			H_1	$-H_4$	$-H_6$
$-\frac{\Delta y}{\ell}$	$r+1$					H_2	$-H_5$
$-\frac{\Delta z}{\ell}$	$r+2$						H_3

Es bedeutet dabei:

$$H_1 = \frac{1}{\ell} - \frac{(\Delta x)^2}{\ell^3}, \quad H_2 = \frac{1}{\ell} - \frac{(\Delta y)^2}{\ell^3},$$

$$H_3 = \frac{1}{\ell} - \frac{(\Delta z)^2}{\ell^3}, \quad H_4 = \frac{\Delta x \Delta y}{\ell},$$

$$H_5 = \frac{\Delta y \Delta z}{\ell}, \quad H_6 = \frac{\Delta z \Delta x}{\ell}.$$

Durch Verwendung dieser exakten nichtlinearen Kinematik wird die geometrische Steifigkeit berücksichtigt, die bei weichen vorgespannten Seilnetzkonstruktionen einen wesentlichen Anteil der Gesamtsteifigkeit ausmacht.

4. Zur numerischen Berechnung

4.1 Rechenannahmen

Bei der Berechnung und Idealisierung aller Beispiele der vorhandenen Arbeit wird zunächst folgendes vorausgesetzt:

I. Annahmen hinsichtlich der Seilelemente:

- 1) Seilelemente besitzen nur Zugfestigkeit. Für sie gilt ein lineares konstitutives Gesetz

$$S_j = CE_{jk} \cdot U_k + \hat{S}_j,$$

wobei der Elastizitätsmodul der Seile $17,0 \cdot 10^7 \text{ KN/m}^2$ beträgt. Große Verzerrungen und physikalische Nichtlinearität werden also ausgeschlossen.

- 2) Seilelemente zwischen zwei Knotenpunkten bleiben gerade und werden eindimensional betrachtet. Der Poisson-Modul ν bleibt dabei Null und damit ändert sich der Querschnitt des Elementes nicht während der Spannungsänderungen.
- 3) Die Seile werden für die ungünstigste Lastkombination gegen effektiven Bruch mit $\nu=2,0$ und gegen die Streckgrenze mit $\nu_{0,2}=1,33$ bemessen. Die Zugfestigkeit der verschlossenen Spiralseile beträgt 1600 N/mm^2 und der Rundlitzen 1200 N/mm^2 .

II. Annahmen hinsichtlich der Belastung:

- 4) Die Lasten werden auf kinematisch äquivalente Knotenlasten umgerechnet und sind konservativ angenommen.

- 5) Entsprechend DIN 1055, Blatt 4, Tafel 1, wird die maximale Windgeschwindigkeit mit 45,6 m/s angenommen, was zu einem maximalen Staudruck von $1,30 \text{ KN/m}^2$ führt.
- 6) Die Verteilung der Windbelastung über die Höhe wird entgegen DIN 1055 ausgerundet entsprechend dem Potenzgesetz

$$q(z) = 1,30 \cdot \left(\frac{z}{z_{\max}} \right)^{0,2}, \text{KN/m}^2,$$

wobei z die Höhenkoordinate und $z_{\max}$ die Gesamthöhe darstellen.

- 7) Der Formbeiwert c wird über den Umfang nach K 6-Kurve gemäß /59/ verteilt und über die Höhe konstant angenommen.
- 8) Es wird ein Innensog mit konstantem C -Beiwert von 0,4 über den Umfang und über die Höhe berücksichtigt.

III. Annahmen hinsichtlich des Systems:

- 9) Die Berechnung wird unter Ausnützung der Symmetrie nur für den halben Turm geführt (0° - 180°).
- 10) Es wird mit einem Grobnetz gerechnet, das nur aus 18 über den Umfang verteilten Maschen besteht.
- 11) Der Vorspannungszustand ist Ausgangs- und Bezugssystem. Er ist ein theoretischer Zustand, bei dem die gewichtslos gedachte Struktur unter den Vorspannkräften im Gleichgewicht ist.

- 12) Es wird sowohl die elastische als auch die geometrische Steifigkeit berücksichtigt. In die geometrische Steifigkeit gehen die Normalkräfte ein.
- 13) Die Stütz- und Verankerungspunkte werden als unverschieblich betrachtet.
- 14) Der innere Zugring eines Speichenrades wird in der Berechnung durch den gemeinsamen Knoten der einzelnen Speichen ersetzt und wird nicht mit dem Mast verbunden angenommen.
- 15) Für den Stahlbetonmast und alle Stahlteile gelten die Materialkennwerte nach den zur Zeit gültigen DIN-Normen und deutschen Vorschriften.

4.2 Programmsystem MESY

In der vorliegenden Arbeit wurde das Programmsystem MESY benutzt /29, 78, 80, 86/. Dieses Programmsystem wurde in den Jahren 1965/66 von SCHRADER /74, 75, 76/ an der Technischen Universität Berlin konzipiert. Zur Berechnung von Sonderkonstruktionen und Parameteruntersuchungen ist die problemgebundene Paketsoftware keine optimale Lösung. Das Programmsystem MESY ist ein Programmbaukasten mit verhältnismäßig Problemunabhängigen autonomen Elementaroperationen der Theorie Mechanischer Systeme (Mesy). Der modale Aufbau verleiht ihm eine hohe Anpassungsfähigkeit, die es gestattet, ggf. mit einzelnen zu ergänzenden Prozeduren die Lösung sehr unterschiedlicher Probleme vorzunehmen.

Hier wird die zum Aufstellen und Auflösen des Gleichungssystems in ALGOL 60 programmierte Standardversion benutzt. Sie wurde auf die Behandlung von Seilnetzkonstruktionen ausgerichtet und in das Betriebssystem der Rechenanlage Telefunken-TR 440 am Rechenzentrum der Ruhr-Universität Bochum implementiert. Mit dieser Version werden bei gegebener Geometrie mit einer im Rahmen der Elementtheorie exakten Gleichgewichtslage des Systems, die zugehörigen Verformungen und Schnittlasten ermittelt. Die Berechnung erfolgt iterativ. In jedem Iterationsschritt gehen jeweils die von der augenblicklichen Systemkonfiguration vorgeschriebenen Werte aktuell ein. Die Iteration endet nach Erreichen einer vorzuschreibenden Genauigkeitsgrenze. Die so ermittelten Zustandsgrößen werden numerisch ausgegeben.

4.3 Datenprogrammssystem

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein eigenständiges Datenprogrammssystem entwickelt worden, welches vollständige Parameterstudien von Seilnetzkühltürmen ermöglicht. Dieses Datenprogrammssystem erzeugt den Datensatz für die gewünschte Variation der Konstruktion des Seilnetzkühlturms durch übersichtliche Algorithmen und unter Einsatz moderner Großrechenanlagen. Es besteht aus über 30 Prozeduren, welche mit einem Individualprogramm gesteuert werden. Die benutzte Programmiersprache ist ALGOL 60.

Die geometrische und die topologische Beschreibung der idealisierten Struktur des Seilnetzkühlturms erfolgt durch dieses Programm. Hierzu gehört die Ermittlung der Knotenkoordinaten und ihrer Numerierung sowie der zugehörigen Freiheitsgrade. Die Unterdrückung von Konfigurationsgrößen an den Knoten, an denen die

Struktur festgehalten wird, wird dabei vom Programm vorgenommen. Die Belastungsvektoren der Knoten aus Eigengewicht und Windbelastung sowie die Elementdaten werden ebenfalls durch das Programm ermittelt. Außerdem wird eine optimale Bandbreite erzielt sowie eine Zusammenstellung des Materialverbrauchs ermittelt. Schließlich werden die Ergebnisse in übersichtlicher Form ausgedrückt. Zur Überprüfung der Eingabedaten und Verringerung Fehleranfälligkeit wird die Geometrie auf dem Bildschirm graphisch dargestellt.

Der Rechenablauf erfolgt im Hinblick auf die umfangreichen Datenmengen im wechselnden Zusammenspiel von Kern- und Hintergrundspeicher. Alle nicht aktuell benötigten Felder werden zur Kernspeicheroptimierung auf Hintergrunddateien ausgelagert. Die Datentransporte zwischen Hintergrund- und Kernspeicher werden durch speziell dazu entwickelten Prozeduren gesteuert. Auf dieses Datenprogrammssystem wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

4.4 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel wird hier der Seilnetzkühlturm Schmehausen berechnet. Die Geometrie und Hauptabmessungen dieses bereits fertiggestellten Kühlturms sind in Bild 4 schon angegeben. Der Verlauf der Seilkräfte des Seilnetzmantels über die Höhe und den Umfang infolge Lastkombination Vorspannung, Eigengewicht, volle Windbelastung und Innensog sind in Bild 18 angegeben. Für die gleiche Lastkombination ist der Verlauf der Knotenverschiebungen im Bild 19 dargestellt. Das Ergebnis konnte an Hand von /72/ überprüft werden.

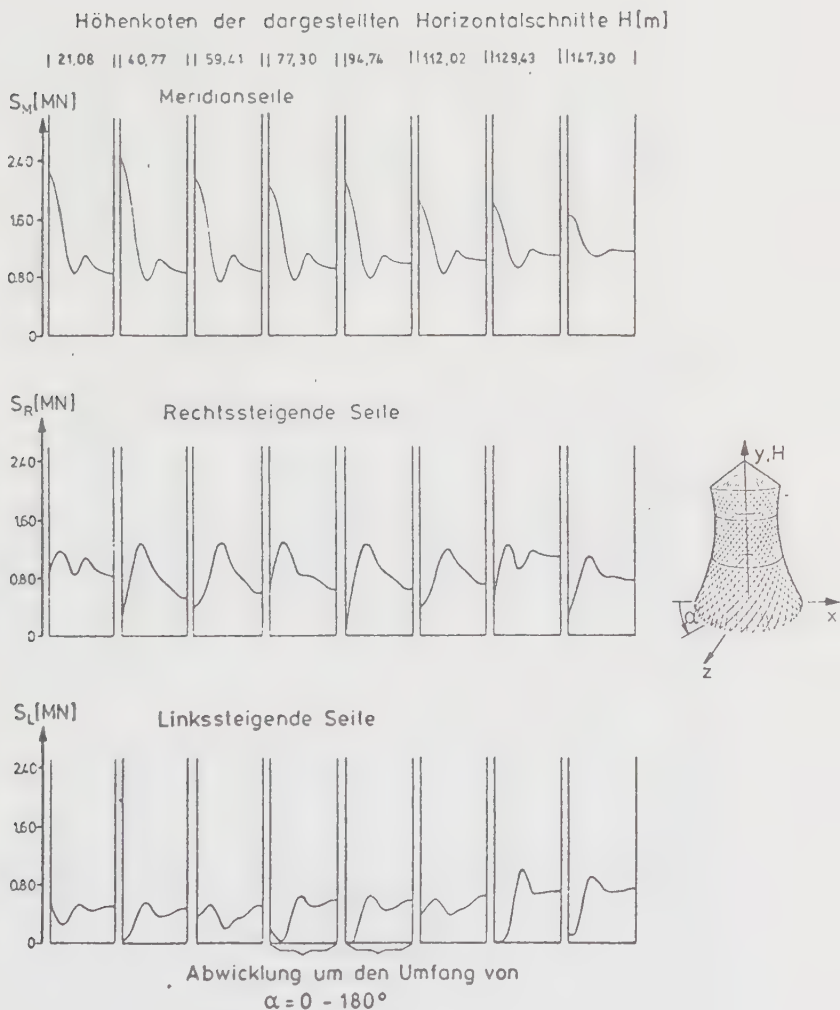
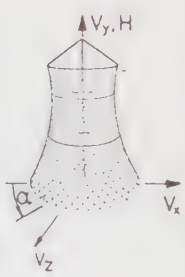
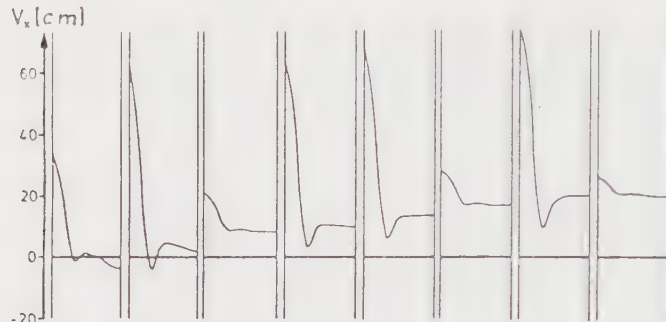


Bild 18: Seilkräfte aus Eigengewicht, Vorspannung und Wind für den Seilnetzkühlturm Schmehausen

Hohenkoten der dargestellten Horizontalschnitte H[m]
 | 21.08 | 40.77 | 59.41 | 77.30 | 94.74 | 112.02 | 129.43 | 147.30 |



Abwicklung um den Umfang von
 $\alpha = 0 - 180^\circ$

Bild 19: Verformungen der Seilnetzkonfiguration
 Schmehausen unter Eigengewicht, Vorspannung
 und Wind

Der Kühlturm ist auf den planmäßigen Wert von 60000 KN bzw. 72000 KN gegen Eigengewicht vorgespannt. Den bleibenden Verformungen, die nach dem Festlegen des Hubringes am Mastkopf noch zu erwarten sind, wird durch eine entsprechend höhere Vorspannung Rechnung getragen. Diese bleibende Verformungen sind aus Reck- und Kriechverlängerung der Seile, Kriechen und Schwinden des Stahlbetonmastes und Fundamentsetzungen zu erwarten. Der Seilnetzmantel bildet etwa 10000 Knoten und umspannt eine Fläche von etwa 46000 m². Er hat dreieckige Meridianmaschen mit 108 Maschen in der Umfangsrichtung und 47 Maschen entlang der Meridiankurve. Er ist aus 216 Meridianseilen und je 108 rechts- und linksgängigen Schrägseilen gebildet. Die aus zwei parallel laufenden Rundlitzen bestehende Netzseile haben eine Mindestbruchkraft von 890 bzw. 536 KN. Die Rundlitzen mit 25 bzw. 20 mm Durchmesser bestehen aus 37 bzw. 19 Alumowelddrähten. In der statischen Berechnung werden zur Vereinfachung je 6 Maschennetze der Ausführung zu einem zusammengefaßt.

Die im Abstand von 10° angeordneten verschlossenen Spiralseile des oberen Speichenrades von 78 mm Durchmesser haben eine Bruchkraft von 6000 KN. Der Seilnetz-mantel ist in ca. 1/3 und 2/3 der Mantelhöhe mit zwei zusätzlichen Speichenrädern ausgesteift. Die Anzahl der Speichen mit einem Durchmesser von 35 mm beträgt 36. Die Verschiebung der Mastspitze unter den vollen Windlasten beträgt nur 14 cm. Die größte Verschiebung der Knoten beträgt 70 cm. Der Materialverbrauch für den Bau dieses Kühlturms ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

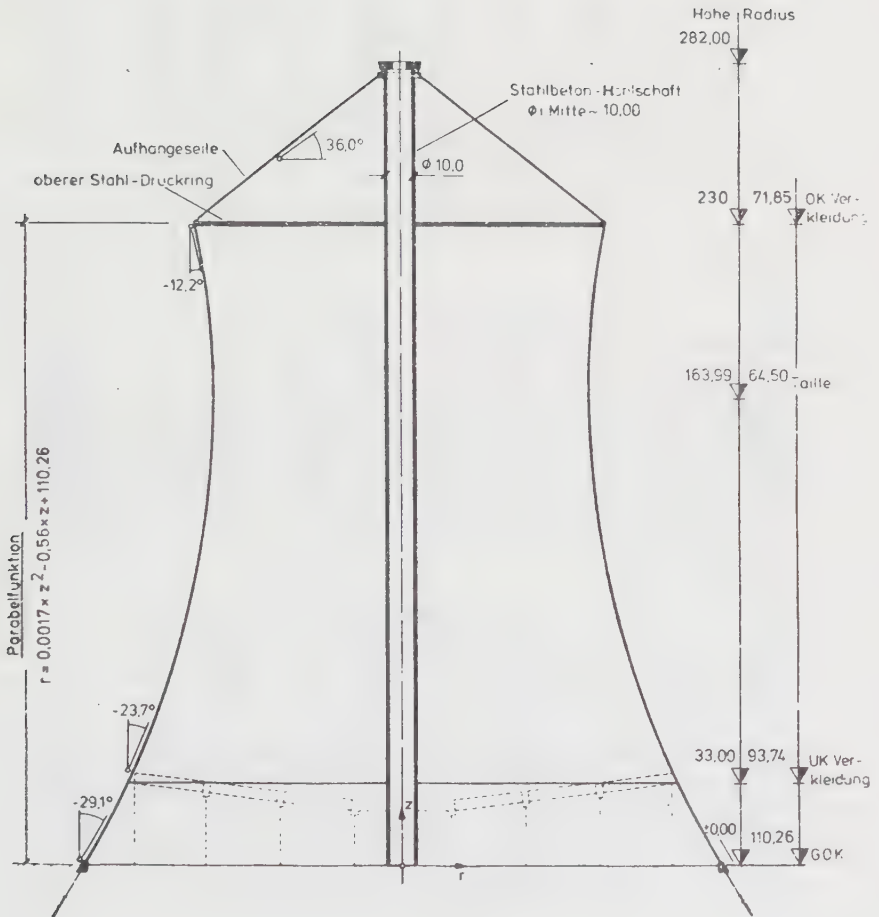
4.5 Demonstrationssystem

Als Demonstrationssystem wurde ein 230 m hoher Seilnetzkühlturm gewählt. Seine Hauptabmessungen sind in Bild 20 angegeben. Die Meridianfunktion ist durch den Basisdurchmesser von 220,52 m, den Taillendurchmesser von 129,0 m und die Taillenhöhe von 163,99 m festgelegt

$$R = 0,0017 \cdot z^2 - 0,56 \cdot z + 110,26.$$

Es besteht geometrische Ähnlichkeit zwischen diesem 230 m hohen Demonstrationssystem und dem in Schmehausen erstellten 147 m hohen Seilnetzkühlturm. Um den Materialverbrauch zwischen diesen beiden Kühltürmen verschiedener Höhe zu vergleichen wird hier zuerst das Demonstrationssystem auch wie im Fall Schmehausen mit zwei Ringen gerechnet. Sie werden auf die Höhenkoten + 92,82 m und + 175,0 m angebracht. Der Verlauf der Seilkräfte über die Höhe und den Umfang infolge der Lastkombination Vorspannung, Eigengewicht und Windbelastung einschließlich Innensog, ist im Bild 21 angegeben. Für die gleiche Lastkombination ist der Verlauf der Knotenverschiebungen im Bild 22 dargestellt. Der Materialverbrauch der beiden Kühltürme ist in Tabelle 1 gegenübergestellt.

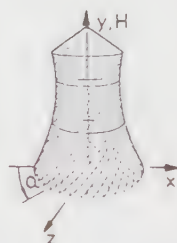
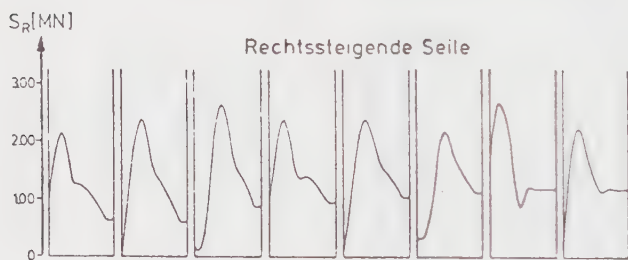
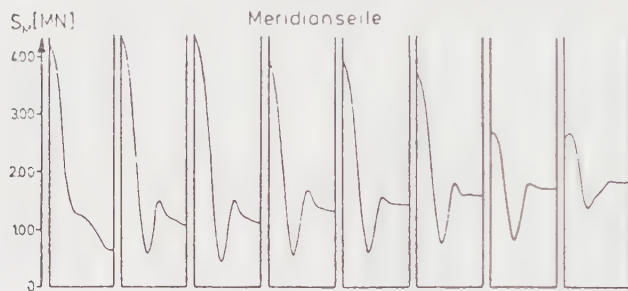
Der Mast leistet einen unwesentlichen Beitrag zur Abtragung der angreifenden Windlasten, da er in der Mitte des Kühlturms steht. Bei einer Gesamtwindlast von 22000 KN ändert sich die Druckkraft im Mast nur um 3000 KN. Die Abtragung der Lasten erfolgt direkt über das Seilnetz. Der Mast hat hauptsächlich die Aufgabe, die Vorspannung im Seilnetzmantel aufrechtzuhalten. Die Beanspruchungen des oberen Speichenrades im Lastfall Wind sind ebenfalls gering. Es hat in erster Linie die Aufgabe, die Eigengewichts- und Vorspannkräfte aus dem Seilnetzmantel in den Mast zu übertragen. Die prozentuale Änderung der Speichen-



Seilnetz-Kühlturm mit einer Höhe von 230 m,
 Querschnitt mit Hauptmaßen

Bild 20

Hohenkoten der dargestellten Horizontalschnitte $H[m]$
 | 32,91 | 63,67 | 92,77 | 120,70 | 147,93 | 174,91 | 202,10 | 230,00 |



Abwicklung um den Umfang von
 $\alpha = 0 - 180^\circ$

Bild 21: Seilkräfte aus Eigengewicht, Vorspannung und Wind eines 230 m hohen Seilnetzkühlturmes

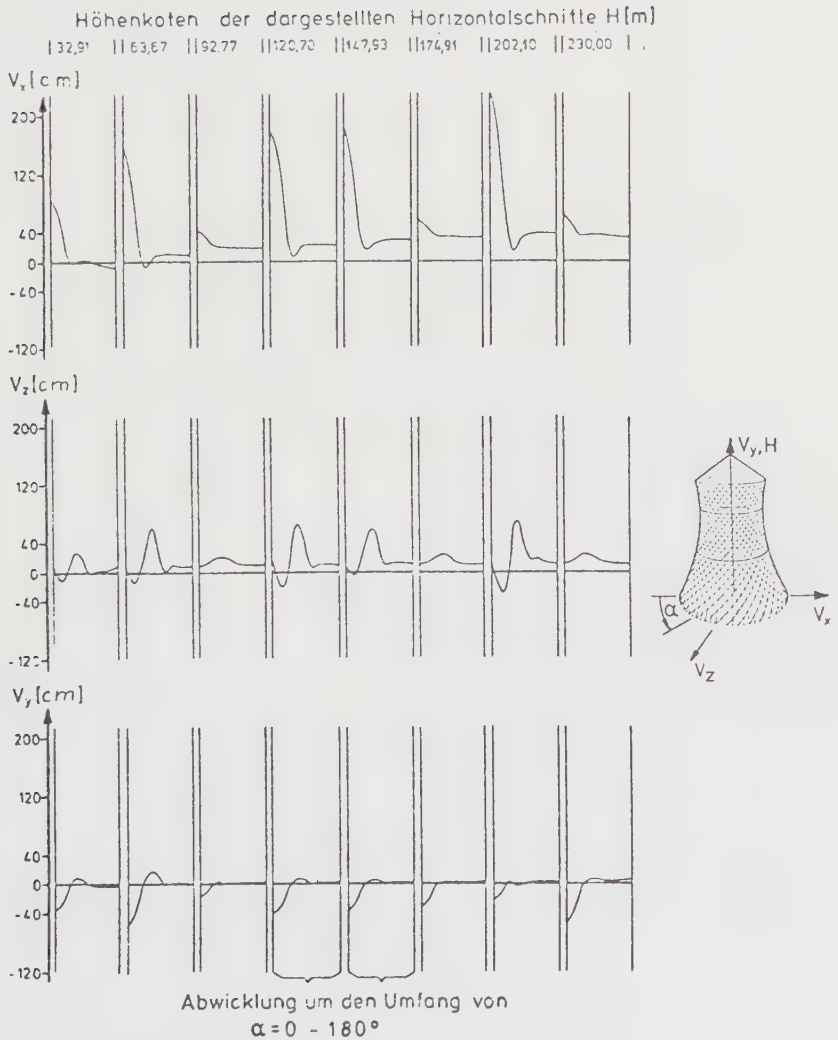
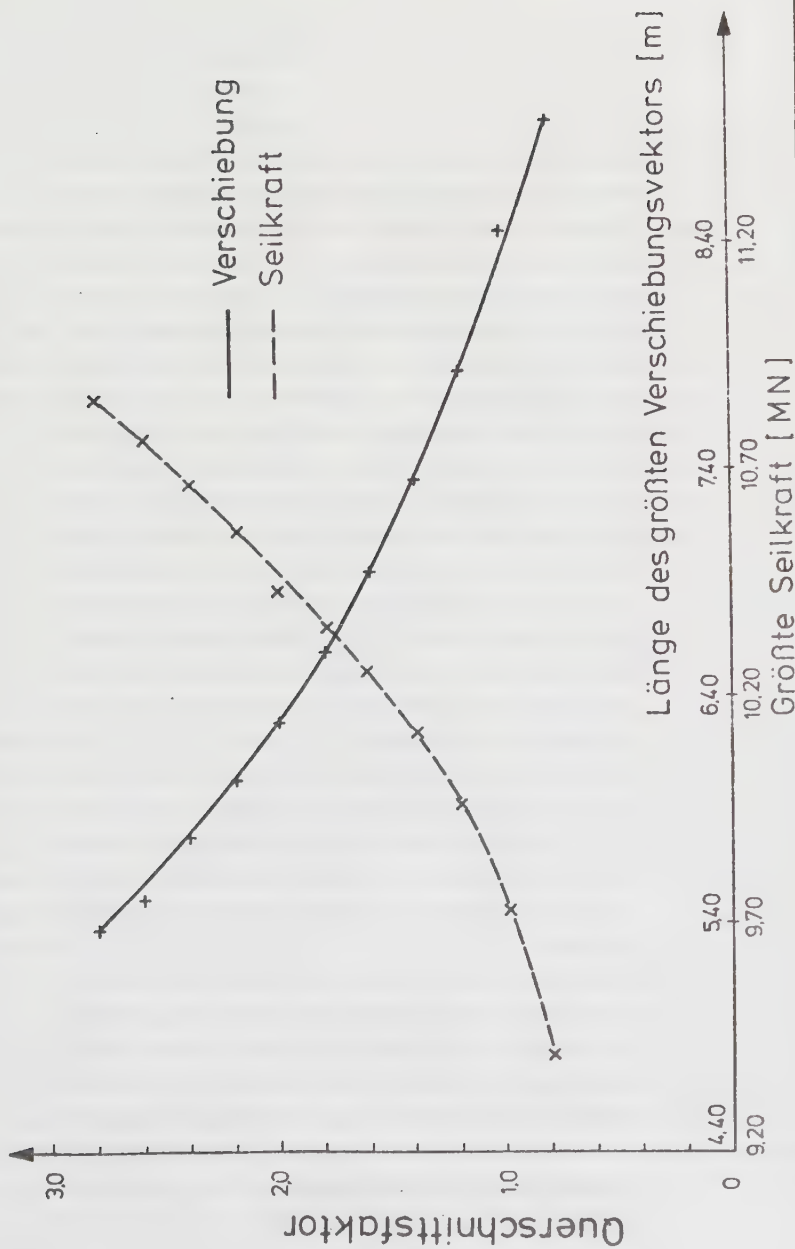


Bild 22: Verformungen der Seilnetzkonfiguration des 230 m hohen Turmes unter Eigengewicht, Vorspannung und Wind.

Kühlturmhöhe	147m	230m
Vorspannseile	408t	1405 t
Baustahl St 52	515t	1500 t
Stahlbeton:		
1) Mastfundament	760m ³	
2) Schaft	1850m ³	
3) Ringfundament	590m ³	
	<u>3190m³</u>	7000m ³
Zugpfähle	20t	50t
Aluminiumverkleidung	263t	630t

Tabelle 1: Materialbedarf zweier verschieden hoher Seilnetzkühltürme



Seilnetzühlturm mit einer Höhe von 230 m

Einfluß der Steifigkeit

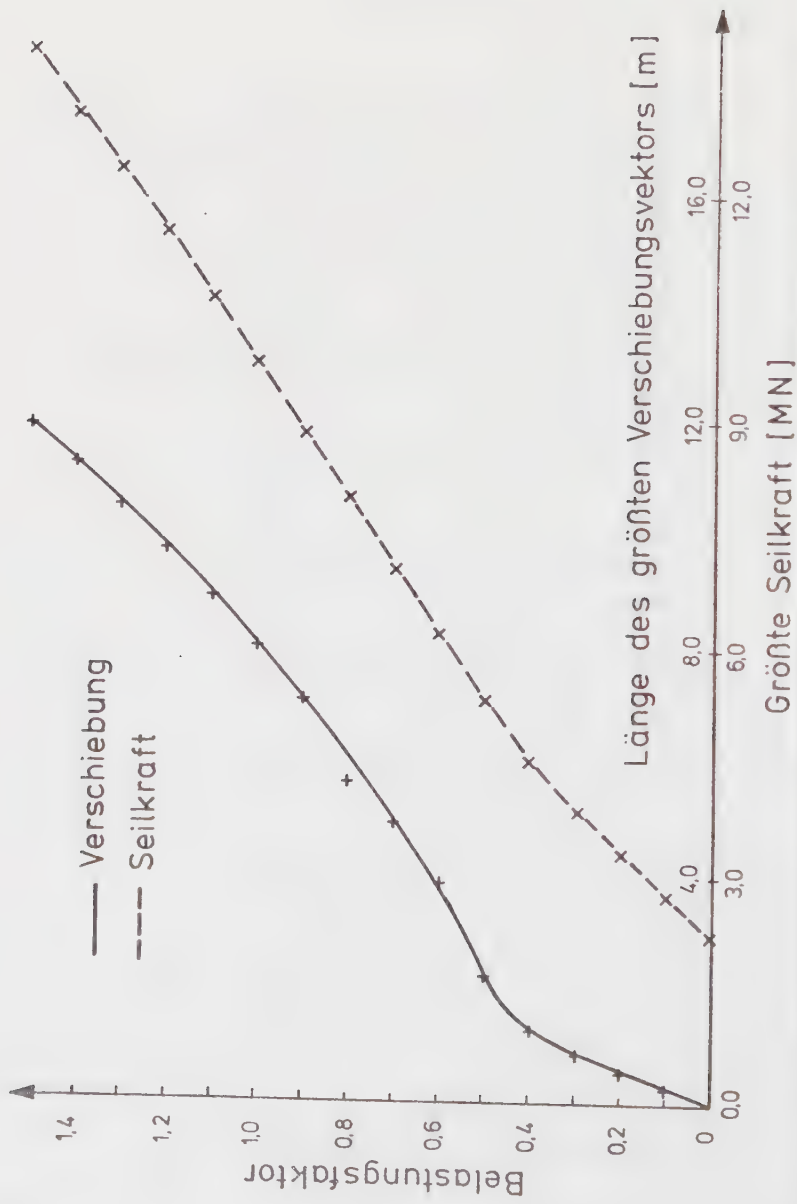
kräfte unter der vollen Windbelastung beträgt nur ca. 5 %.

Die Länge des größten Verschiebungsvektors des Demonstrationssystems ohne Ringversteifungen beträgt 8,44 m unter Windbelastung und bei einer Vorspannung von 80 MN. Diese große Verschiebung kann man durch Erhöhung der Steifigkeit begrenzen. Bild 23 zeigt den Einfluß der Querschnittsflächen der Seile auf den größten Verschiebungsvektor sowie auf die größte Seilkraft. Die Abhängigkeiten sind nicht linear. Bei Verdoppelung der Querschnittswerte der Seile vermindert sich der größte Verschiebungsvektor um ca. 25 %. Jede Vergrößerung der Querschnitte hat aber neben der Erhöhung der Steifigkeit eine Zunahme des Eigengewichts zur Folge, die auf die Wirtschaftlichkeit nachteilig wirkt. Außerdem werden die Seilkräfte größer. Die prozentuale Vergrößerung beträgt dabei ca. 22 % bei Verdoppelung der Querschnittswerte. Daher werden Überlegungen angestellt, das statische Verhalten des Seilnetzmantels auf andere Weise als durch Vergrößerung der Querschnittswerte zu verbessern. In den nächsten Kapiteln wird durch Änderung der maßgebenden Parameter verschiedene Variationen des Demonstrationssystems untersucht. Dabei werden die Werte jeweils eines Parameters variiert, während die Werte der anderen Parameter festgehalten werden. Die daraus gewonnenen Ergebnisse geben Aufschluß über die tendenzielle Abhängigkeit des größten Verschiebungsvektors und der größten Seilkraft von dem untersuchten Parameter. Diese tendenzielle Abhängigkeit ist für das Verständnis des statischen Verhaltens erforderlich. Die hier behandelten Beispiele bilden dabei eine praxisorientierte Auswahl möglicher Seilnetzkonstruktionen.

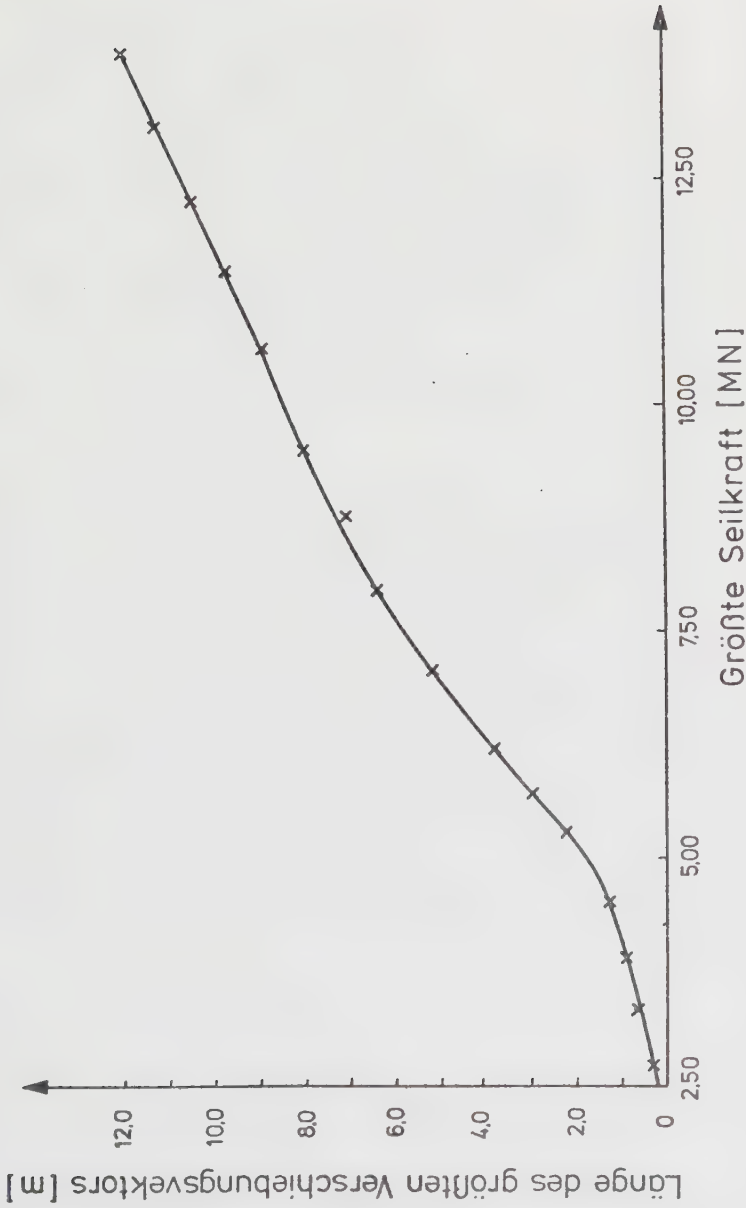
5. Geometrische Nichtlinearität

Um das geometrisch nichtlineare Verhalten der Seilnetz-kühlturmkonstruktion zu zeigen, wurde das Demonstrations-system (Bild 20) für verschiedene Laststufen gerechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind im Bild 24 dargestellt. Dieses Bild zeigt die Abhängigkeit der größten Seilkraft sowie des größten Verschiebungsvektors von den verschiedenen Stufen der Windbelastung. Das Seilkraft-Verschiebungsdiagramm ist im Bild 25 angegeben. Hierbei ist die stark nichtlineare Abhängigkeit zwischen Belastung bzw. Seilkraft und Verschiebung erkennbar. Man sieht, daß der gegensinnig doppelt gekrümmte Seilnetz-mantel ein relativ steifes Seiltragwerk ist und er sich überlinear verhält. Dieses nichtlineare Tragverhalten ist geometrisch bedingt, da das Materialverhalten linear elastisch und die Windbelastung konservativ angenommen wurden. Solche Probleme werden deshalb als geometrisch nichtlinear charakterisiert und sind in der letzten Zeit in den Vordergrund des Interesses von Untersuchungen /9, 23, 37, 67, 93/ gerückt. Sie werden in kleinen Lastintervallen auf dem Wege der schrittweisen Approximation numerisch behandelt und linear gelöst. Zu diesem Zwecke ist das System mit Hilfe der finiten Elementverfahren, das in statischen Fällen zu einem algebraischen Gleichungssystem führt, räumlich diskretisiert.

Die geometrische Nichtlinearität der Seilnetzkonstruktion tritt vor allem infolge großer Verformungen auf, welche die nichtlinearen kinematischen Beziehungen zwischen den generalisierten Systemkoordinaten q_α und den generalisierten Elementkoordinaten u_k zur Folge haben. Dabei bleiben die Verzerrungen u_k relativ klein und damit tritt auf Elementebene keine geometrische Nichtlinearität auf.



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Einfluß der steigenden Belastung



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Seilkraft-Verschiebungsdiagramm bei Zunahme der Belastung

Die linearisierten Systemgleichungen nichtlinearer mechanischer Systeme werden iterativ gelöst. Das Hauptproblem liegt dabei in der mehrfachen Lösung. Diese bedeutet einen enormen Mehraufwand an Rechenzeit im Vergleich zur linearen Berechnung. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens ist deshalb besonders wichtig, da hiervon der Genauigkeitsgrad und die Recheneffizienz abhängen. Grundsätzlich ist diese Auswahl abhängig von den Eigenschaften des mechanischen Systems, der Computerimplementierung und von der gewählten finiten Elementformulierung. Eine Zusammenfassung und Beurteilung der Lösungsverfahren ist in /23, 37/ durchgeführt. Sie bestehen hauptsächlich aus der NEWTON-RAPHSON-Methode, der Inkrement-Methode und deren modifizierten Formen. Für geometrisch nichtlineare Berechnungen eignet sich die NEWTON-RAPHSON-Methode am besten /93/. Die endgültige Gleichgewichtslage mit dieser Methode kann durch eine einzige Laststufe iterativ erreicht werden, sofern die Lösung eindeutig und die Systemsteifigkeitsmatrix nicht schlecht konditioniert ist. Die numerische Schwierigkeit einer schlecht konditionierten Systemsteifigkeitsmatrix kann bei schwach vorgespannten oder ungünstig geformten Seilnetzkühltürme während der statischen Berechnung auftreten. Solche Schwierigkeiten lassen sich durch Vorgabe von Pseudoanfangsverschiebungen bzw. Pseudoanfangsrandschnittlasten, sowie langsamer Erhöhung der Belastung beseitigen.

6. Vorspannungszustand

6.1 Wirkungsweise der Vorspannung

Ohne Vorspannung würden die Seilnetzühltürme ihre Form über dehnungslose Verformungen fast widerstandslos der Verteilung der angreifenden Lasten anpassen und vor allem unter dynamischen Windlasten mit großen Amplituden Schwingen. Dies wird weitgehend durch die Vorspannung ausgeschaltet. Eine Voraussetzung dafür ist, daß das Seilnetz den planmäßigen Vorspannungszustand aufweist.

Durch die Vorspannung ist den Seilelementen ein dauernder Zugspannungszustand eingeprägt. Sie können deshalb aus äußeren Kräften und Wirkungen auch Druckkräfte, ohne drucksteif zu sein, aufnehmen. Die Zugkräfte der Elemente reduzieren sich dann entsprechend. Die Seile werden unter Zugspannungen bleiben, solange ihre Vorspannung nicht aufgezehrt ist. Danach werden sie schlaff und fallen für die Lastabtragung aus. Das Erschlaffen von Seilelementen ist gestattet, weil das vorgespannte System ein hochgradig statisch unbestimmtes System darstellt und viele Möglichkeiten der Lastabtragung und des Lastausgleiches besitzt. Das Erschlaffen von Seilnetzbereichen ist aber nicht gestattet, eine globale Instabilität dieser Bereich tritt auf und es unter Windeinfluß zum unerwünschten Flattern kommt.

Die Vorspannung verleiht dem Seilnetzmantel weiterhin eine zusätzliche nichtlineare geometrische Steifigkeit, die sowohl lokal als auch global gilt. Diese geometrische Steifigkeit ist eine Funktion des vorhandenen Spannungszustandes und der augenblicklichen

deformierten Geometrie. Bei Krümmungsänderungen infolge der Belastung eines Knotens entstehen innere Rückstellkräfte der vorgespannten Seile. Diese beruhen auf der elastischen und der geometrischen Steifigkeit. Dadurch werden die Lasten in den Knoten aufgenommen und deren Einflüsse pflanzen sich über das ganze Seilnetz fort. Mit Zunahme der Krümmungsänderung wird die geometrische Steifigkeit relativ zur elastischen Steifigkeit, die von den Materialkonstanten und den geometrischen Daten abhängt, immer größer.

Da das Verhältnis Eigengewicht zu Gesamtbelastung sehr gering ist, entspricht der Vorspannungszustand hinsichtlich der durch die Vorspannung erzeugten Spannungen praktisch dem Eigengewichtszustand konventioneller Konstruktionen. Die Vorspannung ersetzt also gewissermaßen die Dauerlast aus Eigengewicht. Der Unterschied liegt darin, daß das Eigengewicht bei allen geläufigen Konstruktionen eine genau vorherbestimmbare Größe ist, während die Vorspannung bzw. der Vorspannungszustand bei Seilnetzkühltürmen eine zunächst unbekannte Größe ist, die im Zuge des Optimierungsprozesses erst gefunden werden muß.

6.2 Problem der Formfindung

Im Vorspannungszustand entsteht die Geometrie eines Seilnetzkühlturms als Gleichgewichtszustand gegeneinander vorgespannter Bauglieder. Dabei konzentrieren sich alle Druckkräfte auf wenige Glieder, den Pylon und den Druckring, und es entsteht der unter Zugspannungen entstehende rotationssymmetrische Seilnetzmantel mit einem negativen GAUßschen Krümmungsmaß einer antiklastisch doppelgekrümmten Sattelfläche.

Die Umlenkkräfte verschiedener Seilscharen der Sattel-
fläche mit ihrer entgegengesetzten Krümmung gleichen
sich aus und die Netzknoten stehen damit im Gleich-
gewicht. Da die Gleichgewichtslage dieses Zustandes
nicht bekannt ist, ergibt sich ein Formfindungsproblem
bezüglich der durch Vorspannung und Eigengewicht be-
lasteten Konstruktion. Die Formfindung spielt die
wichtigste Rolle beim Entwurf vorgespannter Seilnetz-
kühltürme und stellt die Hauptschwierigkeit in ihrer
Analyse dar. Man darf nicht, wie bei anderen Konstruk-
tionen, die Anfangskonfiguration und den Kräftezustand
der Vorspannung getrennt behandeln, da sich beide,
wegen der großen Verschiebungen gegenseitig besonders
stark beeinflussen. Die Geometrie kann also nicht
vorab festgelegt werden, sondern sie muß im Laufe
des Formfindungsprozesses entwickelt werden.

Die Aufgabe der Formfindung ist demzufolge, die Geo-
metrie und den Vorspannungszustand so abzustimmen, daß
die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- 1) Die optimale Form des Seilnetzmantels soll unter
dem Vorspannungszustand erhalten werden
- 2) Ausreichendes Krümmungsverhältnis der gegenein-
ander verspannten Seilscharen für einen wirksamen
Versteifungseffekt des Seilnetzmantels soll er-
zielt werden.
- 3) Die Vorspannkkräfte in den Seilen einer Richtung
sollten etwa gleich groß sein, damit alle Seile
möglichst gleichmäßig ausgenutzt werden.
- 4) Das gewünschte Verhältnis der Größe der Vorspann-
kräfte in den Seilscharen soll erhalten bleiben.

Die entsprechenden Variationsprozesse der Formfindung
müssen dann so lange durchgeführt werden, bis die
vorher genannten Bedingungen erfüllt sind. Sie sind

durch zweckmäßige Wahl der Kontur der Meridiankurve, der Hauptabmessungen des Turmes, der Winkel der beiden Netzscharen zueinander, der Knickwinkel an den Knotenpunkten und der Querschnittsverhältnisse der Seilscharen erreichbar. Das Problem der Formfindung kann auch in einigen bestimmten Fällen, auf eine Form beschränkt werden, welche einem gegebenen Vorspannungszustand entspricht.

Die Ermittlung einer günstigen geometrischen Form und des entsprechenden Vorspannungszustandes eines Seilnetzkonstruktion ist also ein sehr wesentliches und komplexes Problem, das im allgemeinen durch Modellversuche /27, 36/, durch iterative Berechnung /2, 3, 41/ oder mit Hilfe von Minimalflächen /60/ gelöst werden kann. Modelluntersuchungen für unterschiedliche Beanspruchungen sind ungenau und langwierig, wegen der Schwierigkeit der Nachahmung des geometrisch nichtlinearen Verhaltens. Bei einem Modell ist es fast unmöglich, die elastische Ähnlichkeit zu gewährleisten und es treten bei der Messung der Modellgeometrie Fehler auf. Dagegen erleichtert die iterative Berechnungsmethode den Entwurf solcher Konstruktionen und führt zu automatischen computerorientierten Formfindungsverfahren. Auf das Konzept der Minimalflächen wird im folgenden Kapitel eingegangen.

6.3 Zu den Minimalflächen

Die geometrische Form von einer rotationssymmetrischen vorgespannten Seilnetzmantelfläche läßt sich mit Hilfe von Minimalflächen /60/ entwickeln, die sich durch Seifenhäutchen physikalisch realisieren lassen. Eine Seifenhaut, die zwischen zwei Koaxialen, in zwei parallelen Ebenen liegenden Drahringen gespannt ist, bildet eine Rotationsminimalfläche. Die Form dieser Fläche ist vom Durchmesser und Abstand der Ringe abhängig. Mit zunehmender Entfernung der Ringe schnürt sich die Seifenhaut ein, wobei ein Höchstabstand nicht überschritten werden kann /63/.

Zuerst hat LAGRANGE das Minimalflächenproblem, welches in der Bestimmung und in der Untersuchung der von gewissen geschlossenen Kurven berandeten Flächen kleinstmöglichen Inhalts besteht, im Jahre 1762 formuliert und entwickelte dabei seinen Algorithmus für die Variationsrechnung. Danach wurde dieses Problem von bedeutenden Mathematikern / Legendre, Meusnier, Weierstrass, Schwarz, Bour u.a. / untersucht, wobei die auf eine Rotationsfläche abwickelbaren Minimalflächen zuerst von E. Bour im Jahre 1862 bestimmt wurden und seither oft als B-Fläche bezeichnet werden.

Eine Minimalfläche ist eine differentialgeometrische Fläche, deren mittlere Krümmung in allen inneren Punkten verschwindet. Also ist an jedem Punkt der Fläche die Summe der positiven und negativen Krümmungsradien gleich Null, d.h. die Fläche ist gegenständig gekrümmt. Daraus folgt, daß auch die inneren Spannungen in der Fläche gleich groß sind und die in ihr gespeicherte potentielle Energie ein Minimum besitzt. Das ist wiederum eine sinnvolle Grundlage für den vorgespannten Seilnetzmantel.

Aufgrund dieser Eigenschaften kann man eine Minimalfläche auch als elastische Membran auffassen, in welcher keine Schubkräfte vorhanden und die äußeren Kräfte Null sind. Die Minimalflächen können mit Hilfe der finiten Elementverfahren dann auch so berechnet werden, daß nur die geometrische Steifigkeit berücksichtigt wird und die Randschnittlasten so vorgegeben werden, daß sich ein isotroper Spannungszustand einstellt.

Zweifellos ist nicht jede Minimalfläche für den Seilnetzmantel geeignet. Vor allem kann sie über große Bereiche schwach gekrümmt sein. Sehr flache Krümmungen sind sehr anfällig gegen Lasten in Richtung der Flächennormalen und erfordern eine erhöhte Vorspannung, die sich letztlich wieder in hohen Rand- und Verankerungskräften niederschlagen.

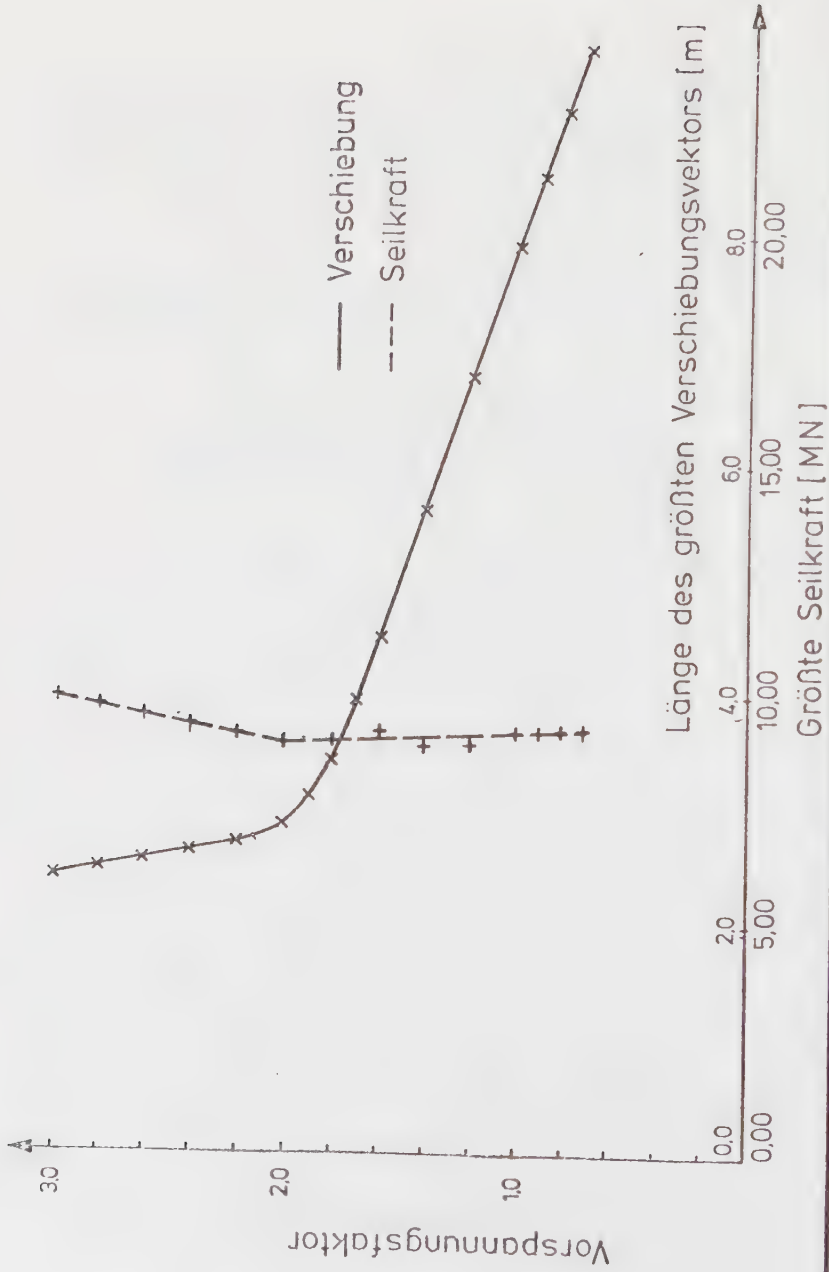
6.4 Einfluß des Vorspannungsgrades

Um den Einfluß des Vorspannungsgrades zu erklären, wurde das im Bild 20 dargestellte 230 m hohe Demonstrationssystem für die Lastkombination Vorspannung, Eigengewicht, volle Windbelastung und Innensog untersucht. Dabei wurden verschiedene Werte für die Vorspannkraft, zwischen 70 MN und 300 MN, eingesetzt und die Berechnung für jeden Wert erneut durchgeführt. Alle anderen Eingangswerte der Eingabedaten wurden festgehalten. In der Tabelle 2 sind den verschiedenen Werten der Vorspannkraft die zugehörigen größten Verschiebungsvektoren und die zugehörigen größten Seilkräfte zugeordnet. Diese Zuordnung ist durch Punkte in Bild 26 dargestellt. Die Abszisse des Bildes stellt die Länge des größten Verschiebungsvektors und die größte Seilkraft dar, die Ordinate die Vorspannkraft. Wir verbinden die Punkte jeder Größenpaare durch eine

Linie. Die durchgezogene Linie gibt den qualitativen Verlauf des von der Vorspannkraft abhängigen größten Verschiebungsvektors an. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die mit der Vorspannkraft auftretende größte Seilkraft.

Das Bild 26 zeigt, daß der größte Verschiebungsvektor stark von der Größe der Vorspannkraft beeinflusst wird, während die größte Seilkraft davon kaum beeinflusst wird, weil die Vorspannung grundsätzlich bei der Belastung für eine ausgeglichene Verteilung der Seilkräfte sorgt. Wir unterscheiden weiter, daß die Kurven drei Einflußphasen des Vorspanngrades darstellen:

- 1) Die erste Phase hat einen sehr günstigen Einfluß auf die Abnahme des größten Verschiebungsvektors. Sie tritt bei einer Vorspannung zwischen 70 MN und 170 MN auf. Die prozentuale Verkürzung des größten Verschiebungsvektors in diesem Bereich beträgt 57 %. Bei einer Zunahme der Vorspannkraft um 1 MN nimmt der größte Verschiebungsvektor um 11,6 cm ab. Je größer die Vorspannung also ist, desto kleiner wird der größte Verschiebungsvektor. Ein solches Verhalten wird als umgekehrt proportional bezeichnet und dadurch definiert, daß das Produkt zugeordneter Werte konstant ist. Der Proportionalitätsfaktor beträgt hierbei ca. 40 und der Kurvenverlauf des größten Verschiebungsvektors stellt ein sehr flaches Hyperbelteil dar, so daß die eingetragenen Punkte nahezu auf einer Geraden liegen. Die Änderungen der größten Seilkraft ist dabei unbedeutend und sie nimmt leicht ab. Viele Seilelemente der linkssteigende Seilschar an der Luvseite fallen in dieser Phase bei der Lastabtragung aus und werden schlaff.



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Einfluß des Vorspannungsgrades

Vorspannungs- grad	Größte Seilkraft	Größte Verschiebung
MN	MN	m
7o	9,78	9,736
8o	9,79	9,167
9o	9,78	8,573
10o	9,73	7,979
11o	9,67	7,383
12o	9,59	6,788
13o	9,6o	6,219
14o	9,63	5,649
15o	9,53	5,333
16o	9,68	4,498
17o	9,71	3,94o
18o	9,7o	3,416
19o	9,76	3,095
20o	9,92	2,858
22o	1o,02	2,659
24o	1o,35	2,61o
26o	1o,7o	2,534
28o	11,15	2,47o
30o	11,4o	2,414

Tabelle 2

Einfluß des Vorspannungsgrades

2) Die zweite Einflußphase des Vorspanngrades ist mit der starken Krümmungsänderung der Kurven charakterisiert. Sie tritt bei einer Vorspannung zwischen 170 MN und 220 MN auf. In diesem Bereich werden sich alle spannungslosen Seilelemente wieder an der Lastabtragung beteiligen. Es tritt dadurch ein Systemwechsel unter Windbelastung ein. Das System hat also eine von der jeweiligen Belastung und dem Grad der Vorspannung abhängige, veränderliche Struktur. Mit zunehmender Vorspannung nehmen die Lasten, die zu einem Systemwechsel führen können zu. Die Kurve der größten Seilkraft ändert ihre Neigung auch in diesem Bereich.

3) Die dritte Einflußphase des Vorspanngrades tritt ab einer Vorspannung von 220 MN auf. Der günstige Einfluß der Vorspannung auf die Abnahme des größten Verschiebungsvektor ist in dieser Phase unbedeutend. Bei einer Zunahme der Vorspannungskraft um 1 MN nimmt der größte Verschiebungsvektor nur um 0,3 cm ab. Die Änderung der größten Seilkraft ist auch in dieser Phase unbedeutend. Sie nimmt jedoch leicht zu.

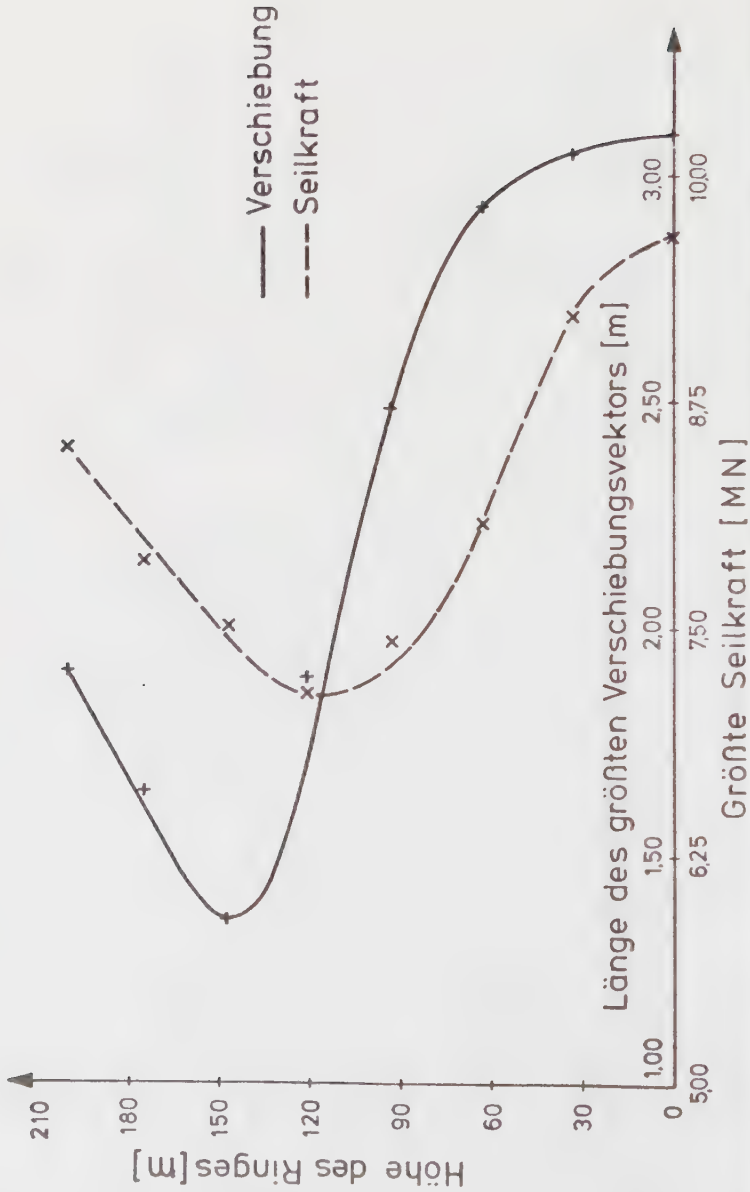
Daraus kommt man zum Schluß, daß zur Eingrenzung der Verformungsspitzen im Seilnetzmantel die erste Einflußphase des Vorspanngrades maßgebend ist.

Es muß hier auch der Einfluß des Vorspanngrades auf die Dauerschwellfestigkeit erwähnt werden. Mit seiner Zunahme nimmt die relative Schwingbreite der Spannungen der einzelnen Bauelemente ab. Bei der Bestimmung seiner Größe muß dieses Problem ebenfalls beachtet werden.

7. Ringversteifte Seilnetz Kühltürme

7.1 Einfluß der Höhenlage eines Versteifungsringes

Die Wahl der Höhenlage eines Versteifungsringes ist für das Verhalten eines Seilnetz Kühlturms von entscheidender Bedeutung. Mit Hilfe dieser Untersuchung kann man die optimale Lage eines Ringes mit einer hohen Wirksamkeit rasch bestimmen. Den Berechnungen liegen die Abmessungen des Demonstrationssystems nach Bild 20 zugrunde. Läßt man den Versteifungsring verschiedene Höhenkoten durchlaufen und vergleicht die so erzielten Ergebnisse der statischen Rechnung jeweils mit den Werten, die sich für den unversteiften Seilnetz Kühlurm errechneten, so definiert der kleinste erreichte Verschiebungsvektor die optimale Höhenlage. Die sich für sieben gewählte Höhenlagen ergebenden Ergebnisse bei einer Vorspannkraft von 200 MN wurden bezüglich der Verschiebungen und Seilkräfte in Bild 27 dargestellt. Die prozentuale Verbesserung dieser Ergebnisse ist in Tabelle 3 aufgestellt. Die durchgezogene Kurve gibt die Länge des größten Verschiebungsvektors an. Die gestrichelte Kurve zeigt den Verlauf der größten Seilkraft. Die Kurvenverläufe stellen die Abhängigkeit der Höhenlage eines Versteifungsringes mit dem größten Verschiebungsvektor und der größten Seilkraft dar. Dabei stehen die Kurvenverläufe in Zusammenhang. Der Vergleich zeigt, daß zwischen ihnen eine Analogie besteht. Die Höhenkoten optimaler Ringlage, einmal für den Verschiebungsvektor und zum anderen für die Seilkraft sind aber unterschiedlich. Die zum größten Verschiebungsvektor gehörige Kurve hat etwa im Bereich der Taille auf Höhenkote 147,93 m ein Extremum mit einer prozentualen Abminderung des größten Verschiebungsvektors um 56,15 % und einer prozentualen Verminderung der größten Seilkraft um 22,21 % gegenüber einem nicht ausgesteiften Seilnetzmantel. Dagegen



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Einfluß der Höhenlage eines Versteifungsringes

hat die zur größten Seilkraft gehörende Kurve auf Höhenkote 120,70 m ein Extremum mit einer prozentualen Abminderung des größten Verschiebungsvektors um 38,74 % und einer prozentualen Verminderung der größten Seilkraft um 26,34 %. Der Vergleich zeigt deutlich, daß die höhere Wirksamkeit bei der Aussteifung des Seilnetzmantels mit einem Ring in der Taille erzielt wird. Diese günstige Wirkung läßt nach, wenn der Aussteifungsring zum Fuß oder zur Mündung des Turmes verschoben wird. Diese Tendenz hat Analogie mit den Verschiebungsvektoren des unversteiften Seilnetzmantels an der Luvseite des Windes. Dabei tritt die größte Verschiebung an der Taille auf.

Die Wirkungsweise des Versteifungsringes beruht auf seiner Verteilerwirkung. Durch diese Wirkung wird der ganze Querschnitt des Seilnetzmantels an der Lastabtragung beteiligt. Man erhält damit gegenüber dem nicht ausgesteiften Seilnetzmantel einen ausgeglichenen Verlauf der Seilkräfte. Da die Größe dieser Kräfte nicht nur für die Bemessung des Seilquerschnittes sondern auch für die Ermittlung der erforderlichen Vorspannung maßgebend ist, wirken sich die Versteifungsringe auf die Bemessung des gesamten Seilnetz Kühlsturms und damit auf den Materialverbrauch besonders günstig aus. Die Versteifungsringe sind weiterhin gegenüber dem Seilnetzmantel völlig steife Schotten, die die ungünstigen dehnungslosen Verformungen des Kreisquerschnittes verhindern. Dadurch werden die Verschiebungsvektoren kleiner.

Die Wirksamkeit der Versteifungsringe dürfte auch von dem Verhältnis der Hauptabmessungen und der Meridiankrümmung abhängen, wie bereits bei Stahlbetonkühlschalen festgestellt wurde /50, 98, 99, 100, 101/.

Höhen- lage	Größte Seilkraft	Prozentuale Änderung	Größte Verschiebung	Prozentuale Änderung
m	MN	%	m	%
00,00	9,681	0,00	3,090	0,00
32,91	9,232	4,65	3,045	1,46
63,67	8,081	16,53	2,934	5,05
92,77	7,403	23,55	2,485	19,58
120,70	7,130	26,34	1,893	38,74
147,93	7,532	22,21	1,355	56,15
174,91	7,864	18,80	1,641	46,86
201,92	8,486	12,39	1,903	38,41

Tabelle 3

Einfluß der Höhenlage eines Versteifungsringes

Anzahl der Ringe	Größte Seilkraft	Prozentuale Änderung	Größte Verschiebung	Prozentuale Änderung
	MN	%	m	%
0	9,803	0,00	6,320	0,00
1	6,901	29,59	2,881	54,43
2	5,956	39,28	2,167	65,82
3	4,452	54,59	1,545	75,63
4	3,803	61,22	1,231	80,53
5	3,451	64,79	1,021	84,17
6	3,207	67,34	0,921	85,44
7	3,024	69,38	0,723	88,60

Tabelle 4

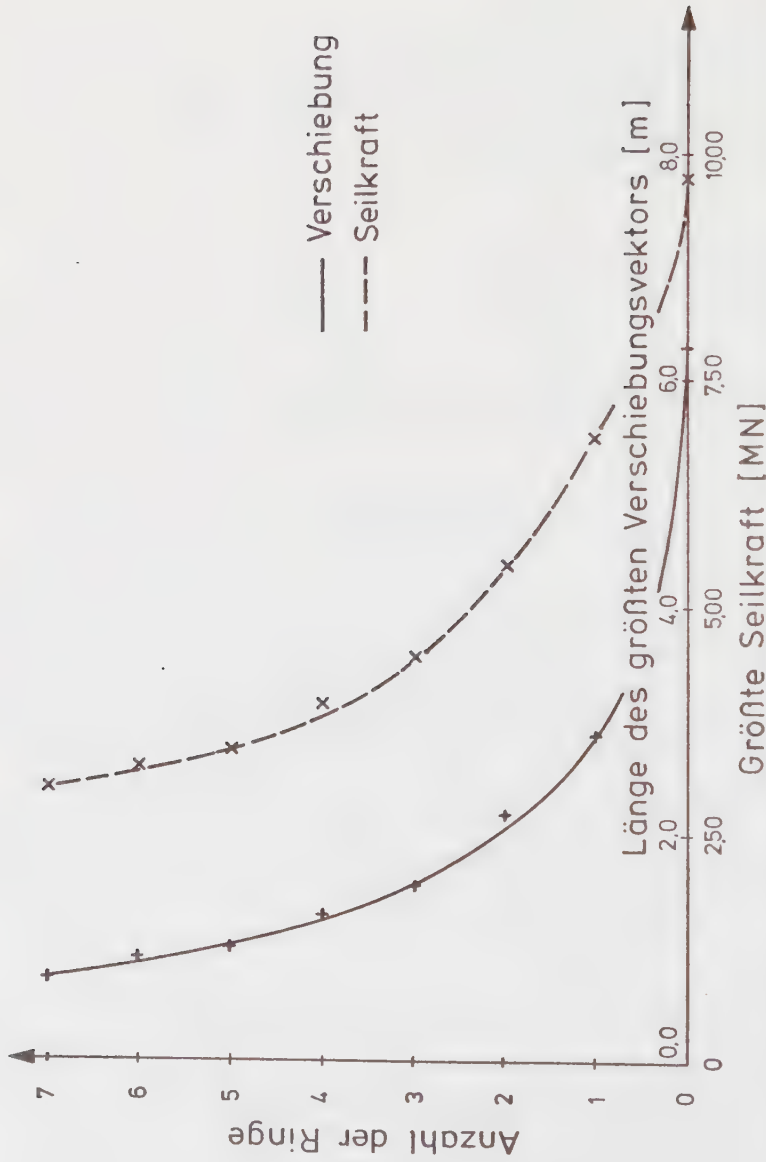
Einfluß der Anzahl der Versteifungsringe

Sie dürfte besonders vorteilhaft sein bei Seilnetz-
kühltürmen mit einem großen Verhältnis des Durchmessers
zur Höhe. Im übrigen lassen sich die Aus-
sagen auf unterschiedliche Geometrieverhältnisse
qualitativ übertragen.

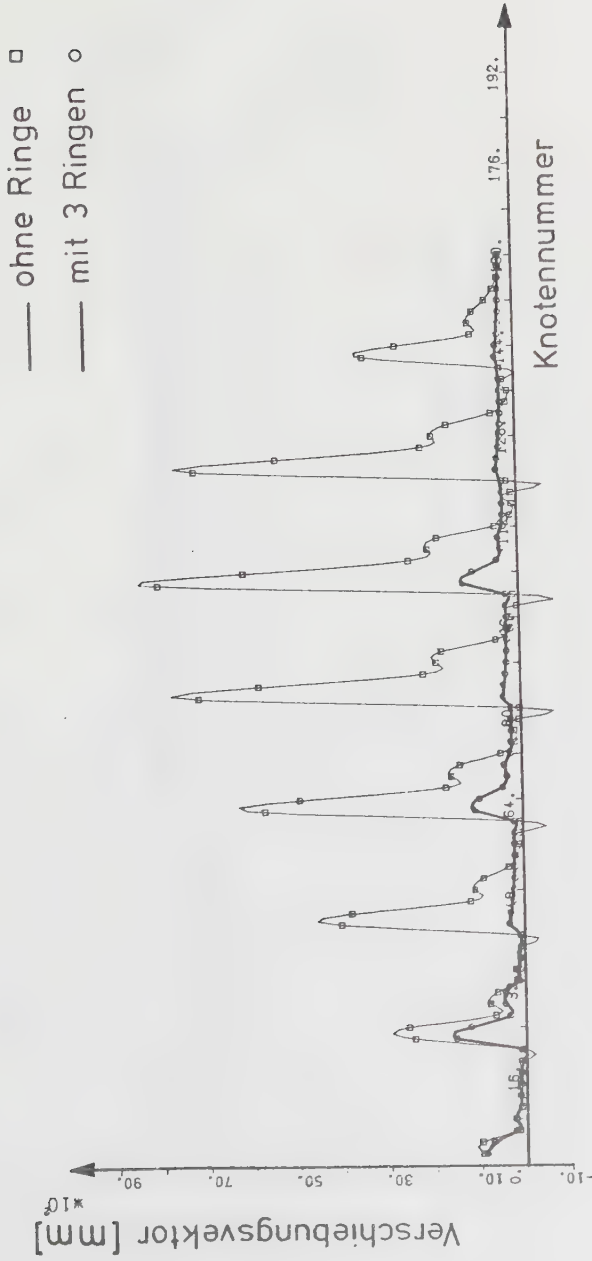
7.2 Einfluß der Anzahl der Versteifungsringe

Nachdem der Einfluß der Höhenlage eines Versteifungs-
ringes geklärt ist, soll nun die Frage nach dem Ein-
fluß der Anzahl der Versteifungsringe gestellt werden.
Das Auffinden der optimalen Höhenlage mehrerer Ver-
steifungsringe, die den Seilnetzmantel am wirkungs-
vollsten versteifen, läßt sich durch die Berechnung
aller möglichen Höhenlagenkombinationen erreichen.
Ein solches Vorgehen benötigt jedoch zu hohe Rechen-
zeit. Eine schnellere Näherung könnte erzielt werden,
wenn man die Erkenntnisse und allgemeine Aussagen des
vorangegangenen Kapitels zugrunde legt. Dabei steigert
man die Anzahl der Versteifungsringe systematisch und
betrachtet jedesmal die Verschiebungen der Netzknoten.
Die betragsmäßig größte Verschiebung bestimmt die
Höhenlage des neuen Versteifungsringes. Dabei wurde
ermittelt, daß die optimalen Höhenlagen nicht äquidi-
stant zu sein brauchen. Ob damit jedoch die optimalen
Höhenlagen aller Ringe gefunden werden, kann nicht ge-
währleistet werden.

Die gezielte Anordnung der Ringe bezüglich der opti-
malen Lagen wird also iterativ anlehnend an die oben er-
wähnten Aspekte durchgeführt. Die numerischen Unter-
suchungen werden dabei anhand des Demonstrationssystem
nach Bild 20 vorgenommen. Die Rechenergebnisse für
die Lastkombination Vorspannkraft von 120 MN, Eigen-
gewicht und Windbelastung einschließlich Innensog,

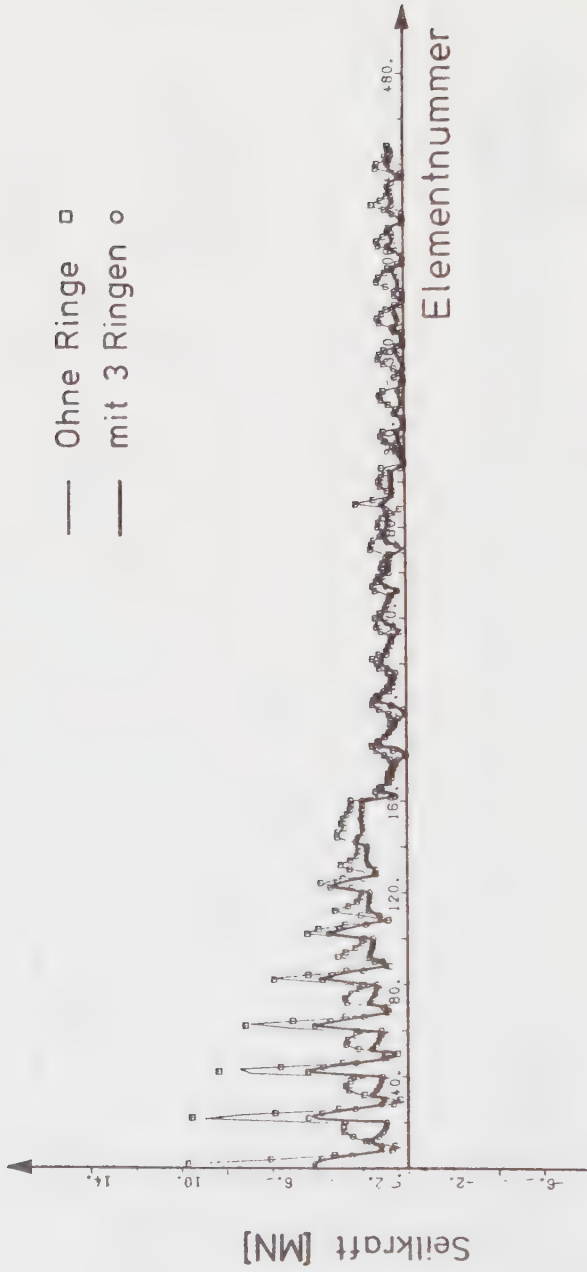


Seilzugkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Einfluß der Anzahl der Versteifungsringe

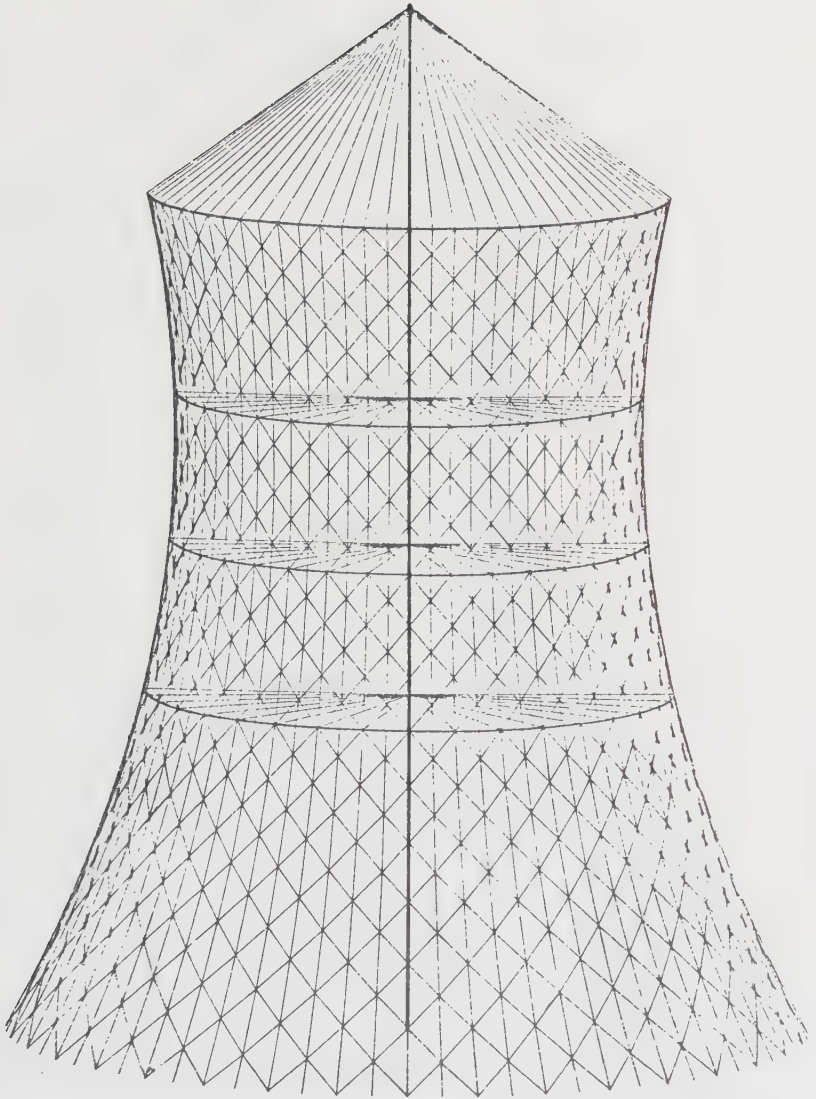


Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Verlauf der Verschiebungen

Bild 29

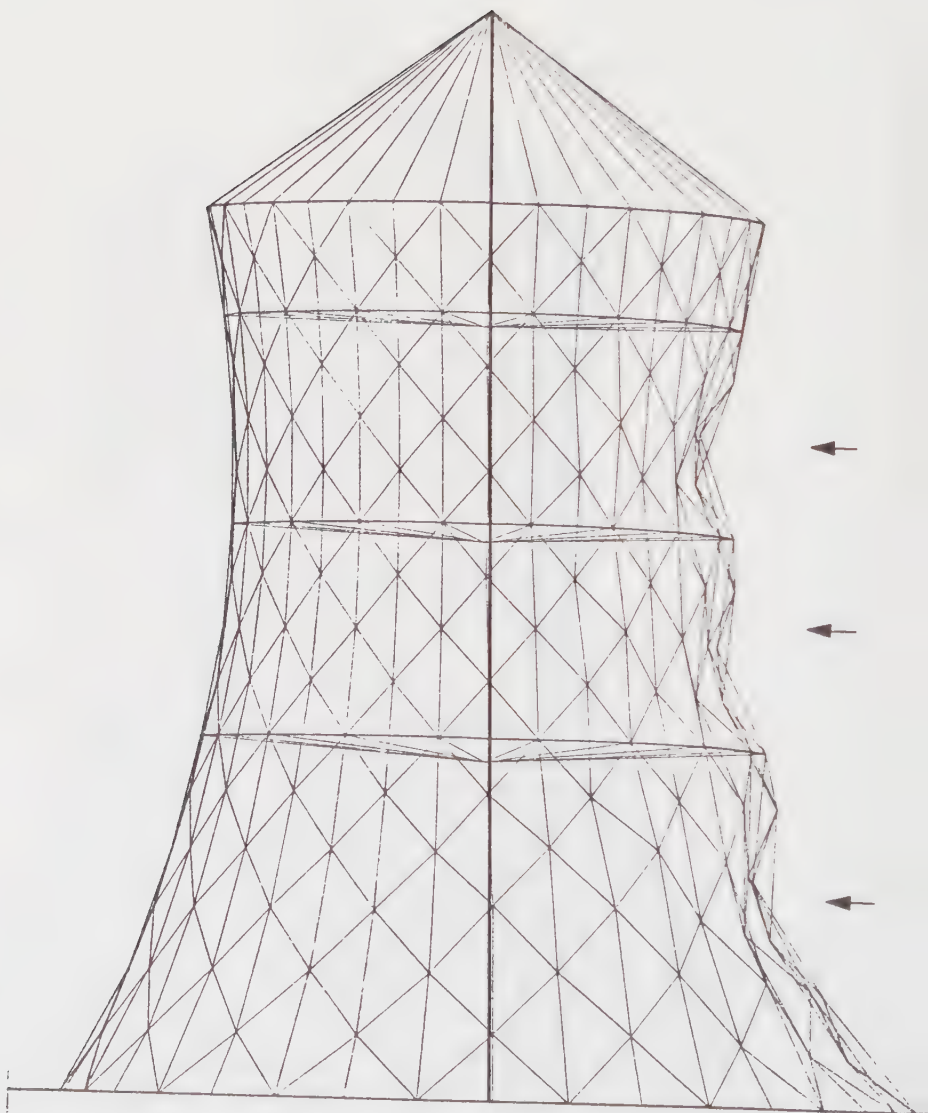


Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m
Verlauf der Seilkräfte



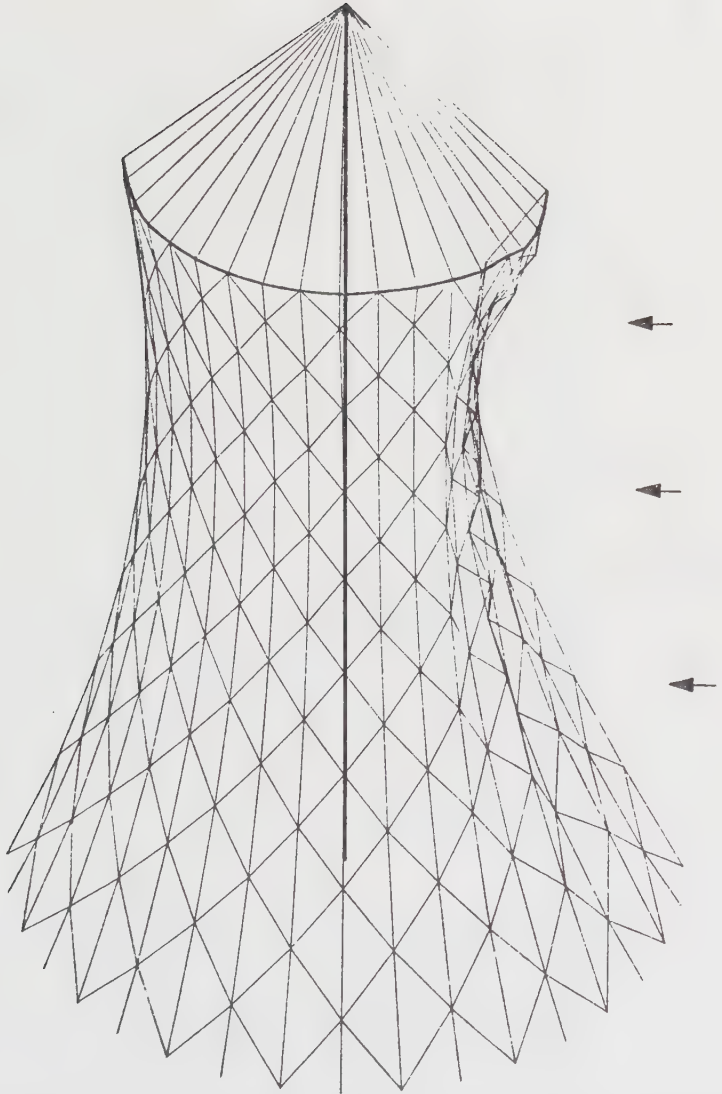
Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m,
Perspektivische Darstellung

Bild 31



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m,
Perspektivische Darstellung unter Windbe-
lastung (mit drei Ringen)

Bild 32



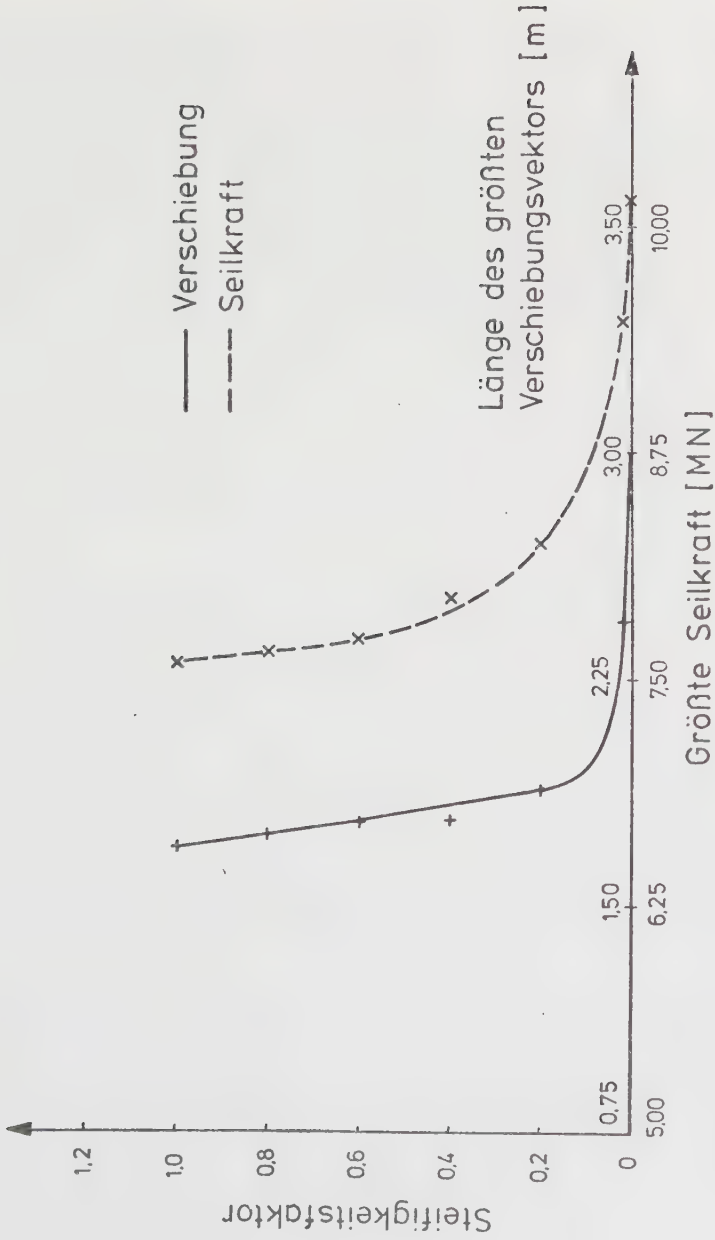
Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m,
Perspektivische Darstellung unter Windbe-
lastung (ohne Ringe)

Bild 33

sind in Tabelle 4 angegeben und in Bild 28 dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen die günstige Wirkung der Ringe. Bei drei gezielt angebrachten Ringen lassen sich Ergebnisverbesserungen von ca. 75 % bezüglich der größten Verschiebungsvektoren und von ca. 55 % bezüglich der größten Seilkräfte erreichen. Die Bilder 29 und 30 zeigen, wie diese drei Ringe als versteifende Verformungs- und lastverteilende Schotten wirken. Bild 31 zeigt eine perspektivische Darstellung der Geometrie dieses Seilnetz Kühlturns. Bild 32 zeigt das verformte System infolge Eigengewicht, Vorspannung und Wind zusammen. Zum Vergleich ist im Bild 33 für die gleiche Lastkombination eine Perspektive des verformten Kühlturns ohne Versteifungsringe angegeben. In den beiden Bildern sind die Verschiebungen dabei 10-fach überhöht. Der steile Anstieg der Kurven ab vier Versteifungsringen deutet jedoch darauf hin, daß die prozentuale Verbesserung mit steigender Anzahl der Ringe kleiner wird. Also ist durch Erhöhung der Anzahl der Ringe über vier keine wesentliche Verbesserung mehr zu erwarten. Ein ähnliches Ergebnis ergab sich auch für Kühlturnschalen /99, 100, 101/.

7.3 Einfluß der Steifigkeit der Speichenseile

An den Versteifungsringen greifen unter Windlasten von dem Seilnetzmantel her Schubkräfte an. Diese Schubkräfte stehen in sich über den Umfang im Gleichgewicht. Ein Ring ohne Speichen wird unter ihrer Wirkung sehr stark beansprucht. Die Wirkungsweise der Speichen beruht darauf, daß sie relativ kleine Radialverformungen des Ringes zulassen, ohne daß er dafür biegesteif zu sein braucht. Der Ring wird dadurch so steif, daß er zur vollen Aufnahme der Schubkräfte in der Lage ist. In den vorgespannten Speichen treten dabei zusätzliche Zug- und Druckkräfte auf. Diese gleichen sich über ihren



Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230m
Einfluß der Steifigkeit der Speichenseile

inneren Knoten aus. Eine Voraussetzung dafür ist, daß die Speichen den optimalen Querschnittswert aufweisen und daß sie die notwendige Vorspannung besitzen. Bild 34 zeigt den Einfluß der Steifigkeit der Speichenseile auf den größten Verschiebungsvektor und die größte Seilkraft. Die Zunahme der Steifigkeit hat einen sehr günstigen Einfluß bis zu einer bestimmten Grenze. Danach läßt diese Wirkung nach. Der Bereich mit der starken Krümmung bestimmt diese Grenze.

8. Schlußbetrachtungen

Die auftretende Verformungen der Seilnetzkühltürme unter der Windbelastung sollen im Sinne der Nutzung des Bauwerks vertretbar sein. Zu große nicht vertretbare Verformungen können örtlich, an der Luvseite des Seilnetz-mantels auftreten. Ihre zulässige Grenze hängt von der Verformungswilligkeit der Mantelhaut ab. Die Verkleidung darf am verformten Seilnetz nicht überdehnt oder nicht sehr schlaff werden. Man spricht hier von Bedingungen der Gebrauchsfähigkeit. Es sollen deshalb Maßnahmen getroffen werden, die die Verformungs- und Verschiebungsspitzen im Seilnetzmantel eingrenzen. Abhilfe für diese Eingrenzung schafft entweder die Erhöhung der Vorspannung oder der Einbau von aussteifenden Speichenrädern.

Der Vorspannungsgrad ist für die Dimensionierung aller Bauelemente eines Seilnetzkühlturms von entscheidender Bedeutung. Er darf weder zu klein noch zu groß gewählt werden. Bei sehr kleiner Vorspannung fallen viele Seilelemente bei der Lastabtragung unter Wind aus, was Kräfteumlagerungen und rigorose Änderungen des Tragsystems verursacht, daß zu lokalen Singularitäten in der Steifigkeitsmatrix führen kann. Eine sehr hohe Vorspannung verursacht eine wesentlich massivere Konstruktion, da die Vorspannkräfte gewissermaßen zweimal getragen werden müssen. Einmal wird die Vorspannung als Druckkraft über den Mast und dessen Fundament in den Boden geleitet, zum anderen müssen die in den Seilelementen vorhandenen Zugkräfte der Vorspannung durch die an einem Ringfundament angeordneten Bodenanker aufgenommen werden. Entscheidend ist, daß von der möglichen Vielfalt konstruktiver Lösungen Gebrauch gemacht wird, so daß die Vorspannung zur Begrenzung der Verschiebungen nicht unnötig hoch wird.

Beim Übergang des Seilnetz Kühlsturms in einen Nachbarzustand hat der Anteil der Starrkörperverschiebungen gegenüber denen der reinen Dehnungen übergeordnetes Gewicht. Daraus folgt, daß der Verschiebungszustand der Netzknoten am wirksamsten durch gezielte Maßnahmen beeinflusst werden kann. Dazu bietet sich die Versteifung durch geeignete Anzahl von Ringen an, die eine enorme Vergrößerung der Steifigkeit bewirken und von ebenso großer Wichtigkeit, wie der gewählte Vorspannungsgrad sind. Der Einbau von zwei Versteifungsringen z.B. vermindert die größten Verschiebungsvektoren um ca. 66 %, die Verdoppelung der Vorspannung hingegen nur um 63 %. Die Versteifungsringe bauen nicht nur die Verschiebungsspitzen ab, sondern auch die größten Seilkräfte. Schon die Anordnung von einem Versteifungsring in der Taille vermindert die größte Seilkraft um ca. 30 %. Das ist schon ein entscheidender Vorteil gegenüber der Erhöhung der Vorspannung, die die größte Seilkraft unter Windbelastung nur geringfügig beeinflusst. Da die Größe dieser Kräfte maßgebend für die erforderliche Vorspannung ist, wirken sich die Versteifungsringe auch auf die Optimierung der Größe der Vorspannung selbst aus. Dadurch beeinflussen sie den gesamten Kräftehaushalt des Seilnetz Kühlsturms sehr günstig und damit die Bemessung aller Bauteile und den Materialverbrauch.

9. Verzeichnis der Tabellen und Bilder

	Seite
Tabelle1: Materialbedarf zweier verschieden hoher Seilnetzkühltürme	56
Tabelle2: Einfluß des Vorspannungsgrades	71
Tabelle3: Einfluß der Höhenlage eines Versteifungs- ringes	76
Tabelle4: Einfluß der Anzahl der Versteifungsringe	76
Bild 1: Plotterzeichnung Seilnetzkühlturm Schmehausen	6
Bild 2: Schematische Darstellung der Entwicklung der Kraftwerksblöcke in der BRD	6
Bild 3: Zwei Seilnetzkühltürme gleicher Leistung in Relation zu einem 1200 MW-Kernkraftwerk	6
Bild 4: Konstruktionsprinzip Seilnetzkühlturm Schmehausen	16
Bild 5: Ausbildung eines Netzknotens	16
Bild 6: Anschluß der Verkleidung	16
Bild 7: Viereckige Maschen	18
Bild 8: Seilumlenkung gegen Druckringe	18
Bild 9: Dreieckige Ringmaschen	18
Bild 10: Dreieckige Meridianmaschen	18
Bild 11: Montageablauf in Schmehausen	21
Bild 12: Montagevorschlag nach Krupp	21
Bild 13: Montage der Beplankung mittels Be- fahranlagen	23
Bild 14: Montage der Beplankung mittels Teles- kopkran	23
Bild 15: Beschreibung der Kinematik durch Systemkoordinate	30
Bild 16: Beispiel für Gleichgewichtslagen	39
Bild 17: Kinematik des Seilelements	41

	Seite
Bild 18: Seilkräfte aus Eigengewicht, Vorspannung und Wind für den Seil- netzkühlturm Schmehausen	49
Bild 19: Verformungen der Seilnetzkonfiguration Schmehausen unter Eigengewicht, Vor- spannung und Wind	50
Bild 20: Seilnetzkühlturm mit einer Höhe von 230 m, Querschnitt und Hauptmaßen	53
Bild 21: Seilkräfte aus Eigengewicht, Vor- spannung und Wind eines 230 m hohen Seilnetzkühlturms	54
Bild 22: Verformungen der Seilnetzkonfiguration des 230 m hohen Turmes unter Eigenge- wicht, Vorspannung und Wind	55
Bild 23: Einfluß der Steifigkeit	57
Bild 24: Einfluß der steigenden Belastung	60
Bild 25: Seilkraft-Verschiebungsdiagramm bei Zunahme der Belastung	61
Bild 26: Einfluß des Vorspannungsgrades	70
Bild 27: Einfluß der Höhenlage eines Ver- steifungsringes	74
Bild 28: Einfluß der Anzahl der Versteifungs- ringe	78
Bild 29: Verlauf der Verschiebungen zweier Seil- netzkühltürme mit einer Höhe von 230 m	79
Bild 30: Verlauf der Seilkräfte zweier Seilnetz- kühltürme mit einer Höhe von 230 m	80
Bild 31: Perspektivische Darstellung eines Seil- netzkühlturms mit einer Höhe von 230 m	81
Bild 32: Perspektivische Darstellung unter Wind- belastung eines Seilnetzkühlturms mit einer Höhe von 230 m (mit drei Ringen)	82
Bild 33: Perspektivische Darstellung unter Wind- belastung eines Seilnetzkühlturms mit einer Höhe von 230 m (ohne Ringe)	83
Bild 34: Einfluß der Steifigkeit der Speichenseile	85

10. Literaturverzeichnis

- / 1/ Angelopoulos, T.: Zur Formfindung und Dynamik von vorgespannten Netzwerkkonstruktionen. Dissertation an der Universität Stuttgart, 1977.

- / 2/ Argyris, J.H.; Angelopoulos, T.: Ein Verfahren für die Formfindung von beliebigen vorgespannten Netzwerkkonstruktionen. Beitrag zum 9. IVBH Kongreß, Amsterdam Mai 1972, S. 385 - 392.

- / 3/ Argyris, J.H.; Angelopoulos, T.; Bichat, B.: A General Method for the Shape Finding of Lightweight Tension Structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol 3, pp. 135-149, No. 1, Jan. 1974
Auch ISD-Report Nr. 146.

- / 4/ Argyris, J.H.; Schrapf, D.W.: Berechnung vorgespannter Netzwerke. Bayerische Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Sitz.-Ber. (1970) S.26-58.

- / 5/ Argyris, J.H.; Dunne, P.C.; Angelopoulos, T.: Nonlinear Oscillations Using the Finite Element Technique. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart. ISD-Report Nr. 136/1972.

- / 6/ Argyris, J.H.; Angelopoulos, T.: Theorie, Programm-entwicklung und Erfahrung an vorgespannten Netzwerkkonstruktionen. Beitrag zum 9. IVBH Kongreß, Amsterdam, Mai 1972, S. 377-384.

- / 7/ Arnold, P.: Modell und Anwendung eines stochastischen Prozesses zur Untersuchung erdbebenerregter Tragwerke. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1977.

- / 8/ Barnes, M.R.: Interaktive graphical design of tension surface structures.
Symposium "Weitgespannte Flächentragwerke" des SFB 64, Stuttgart 6.-9. April 1976.

- / 9/ Baron, F.; Venkatesan, S.: Nonlinear Analysis of Cable and Truss Structures. Journal of the Structural Division, ASCE, ST 2, pp. 679-710, Feb. 1971.

- / 10/ Benz, H.-J.: Linearisierte Stabilitäts- und Schwingungsberechnung bei versteiften Rotationsschalen.
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1976.

- / 11/ Boegershausen, H.: Berechnung allgemeiner Flächentragwerke mit Hilfe nichtlinearer Koordinatenfunktionen.
Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1976.

- / 12/ Börnke, F.: Entwicklung des Kühlturmbaues. Zentralblatt für Industriebau, H. 9, 1976.

- / 13/ Bopp, H.; Krauß, H.; Preuss, H.D.: Photogrammetrische Vermessung des Trockenkühlturms Schmehausen und anschließende Formkontrolle, Bildmessungen und Luftbildwesen. H.3 (1+77), S. 78-81.

- / 14/ Brocks, W.: Konvergenz von Iterationsverfahren zur nichtlinearen Berechnung statischer Gleichgewichtslagen mechanischer Systeme. Dissertation, Technische Universität Berlin 1971.

- / 15/ Braun, R.; Jasch, E.: Großkühltürme in vorgespannter Seilnetzkonstruktion für die Trockenruckkühlung in zukünftigen Kraftwerken, Techn. Mitt. Krupp. Werks Ber. 32 (1974) S. 97-104.

- / 16/ Braun, R.; Jasch, E.: Die Entwicklung von Naturzug-Trockenkühltürmen in vorgespannten Seilnetzkonstruktion unter Berücksichtigung der Bauwerksaerodynamik. Techn. Mitt. Krupp, Werks-Ber. 33 (1975), S.23-40.

- / 17/ Burkhardt, B.; Hennicke, J.: Leichte Flächentragwerke-Industrialisierung in Planung und Ausführung Industrialisierung des Bauens (IB) Heft Nr. 18, S.34-40.

- / 18/ Egger, H.; Jasch, E.; Rümmelein, R.: Hinweise zur praktischen Ausarbeitung von Zuschnitten für gleichmaschige gespannte Seilnetze. Beitrag zum 9. IVBH Kongreß, Amsterdam Mai 1972, S. 355-364.

- / 19/ Erdmann, W.: Erfahrungen beim Bau des Seilnetzühlturmes Schmehausen. VGB-Kraftwerkstechnik 57. T., Heft 3/1977, S. 206-215.

- / 20/ Felippa, C.A.: Finite Element Analysis of Three-Dimensional Cable Structures. Proceedings of the International Conference on Computational Methods in Nonlinear Mechanics. Held at the University of Texas at Austin, pp. 311-324, Austin, Texas, 23-25 Sept. 1974.

- / 21/ Grieger, I.: Über den Einsatz von Bildschirmgeräten bei der Berechnung von Tragwerken. Dissertation an der Universität Stuttgart, 1972.

- / 22/ Grieger, I.: Interactive Graphis Analysis, User's Reference Manual.
ISD-Report Nr. 156, Stuttgart 1974.

- / 23/ Haisler, W.E.; Stricklin, J.A.; Stebbins, F.:
Development and Evaluation of Solution Procedures
für Geometrically Nonlinear Structural Analysis.
AIAA Journal, Nr. 10 (3), pp. 264-272, March 1972.

- / 24/ Hamel, G.: Theoretische Mechanik. Eine einheitliche
Einführung in die gesamte Mechanik, 1949. Berichtigter
Nachdruck 1967. Springer-Verlag. Berlin/Heidelberg/
New York.

- / 25/ Hampe, E.: Kühltürme. VEB Verlag für Bauwesen Berlin.

- / 26/ Hampe, E.; Greiner-Mai, D.: Senkung des Materialein-
satzes und Verbesserung der Tragqualität von hyper-
bolischen Großkühltürmen Bauplanung-Bautechnik 29,
1975, Heft 7, S. 328-333.

- / 27/ Hanenkamp, W.: Zum dynamischen Verhalten von vorge-
spannten Seilnetzwerken, Konstruktiver-Ingenieurbau-
Berichte aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieur-
bau der Ruhr-Universität Bochum, H. 24, herausgegeben
von o.Prof. Dr.-Ing.Dr.-Ing.E.h. W.Zerna.

- / 28/ Harnach, R.: Some Investigations on the optimal Design
of Tall Natural Draught Cooling Towers. IASS Symposium-
Paris 1978.

- / 29/ Hartmann, B.; Schrader, K.-K.; Winkel, G.: MESY-Ein
Programmsystem zur Untersuchung von Tragwerken.
Konstruktiver Ingenieurbau, Berichte, Heft 22 (1975),
Vulkan-Verlag, Essen 1975.

- / 30/ Hartmann, B.: Ein koordinateninvariantes Finite-Element-Verfahren. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1975.
- / 31/ Haug, E.: Formermittlung von Netzen. Die Bautechnik 9/1971, S. 294-299.
- / 32/ Hirschfelder, G.: Entwicklungsstand und Entwicklungstendenzen von Kernkraftwerken mit Hochtemperaturreaktoren, VGB Kraftwerkstechnik 57 (1977), H. 1, S. 816.
- / 33/ Hirschfelder, G.: Der Trockenkühlturm des 300-MW-THTR-Kernkraftwerkes in Schmehausen-Uentrop, VGB- Kraftwerkstechnik 53.T., Heft 7/1973, S. 463-471.
- / 34/ Jasch, E.: Die Anwendung von Seilnetz-Konstruktionen zum Bau von Kühltürmen. Bauingenieur 49 (1974), S. 421-429.
- / 35/ Jawerth, D.; Schulz, H.: Ein Beitrag zur Frage der Eigenschwingungen, windanfachenden Kräfte und aerodynamischen Stabilität bei hängenden Dächern. Der Stahlbau, 35 J. Heft 1/1966, S. 1-8.
- / 36/ Jensen, J.J.: Eine statische und dynamische Untersuchung der Seil- und Membrantragwerke. Division of Structural Mechanics, The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Norway 1970.
- / 37/ Kao, R.: A Comparison of **NEWTON-RAPHSON** Methods and **Incremental** Procedures for **Geometrically Nonlinear Analysis**. Computer and Structures, Vol. 4, pp. 1091-1097, 1974.

- / 38/ Kar, K.A.; Okazaki, C.Y.: Convergence in Highly Nonlinear Cable Net Problems. Journal of the structural Division of ASCE, March 73, S. 321-334.

- / 39/ Kleinhanß, K.: Beitrag zur Berechnung von Seilen und Seilnetzen, Mitteilungen aus dem Sonderforschungsbereich 64 (SFB 64) an der Universität Stuttgart, Nr. 12/1973.

- / 40/ Knudson, W.; Nagy, D.: Spline Interpolation and Automatic Generation of Initial Geometry of Cable-Net Structures. Bericht aus dem Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart.
ISD-Report Nr. 140, 1973. Auch in SFB 64 Mitteilung 24/1975.

- / 41/ Knudson, W.C.; Scordelis, A.C.: Cable Forces for Disired Shapes in Cable-Net Structure. IASS Pacific Symposium-Part II, October 17- 23, 1971, Tokyo and Kyoto.

- / 42/ Knudson, W.C.: Static and Dynamic Analysis of Cable-Net Structures. Ph. D. Dissertation (1971), University of California at Perkeley.

- / 43/ Krätzig, W.B.: Kühlturmformen besonderer Wirtschaftlichkeit Konstruktiver-Ingenieurbau-Berichte, Vulkan-Verlag, Essen, Heft 1/1968, S. 84-86.

- / 44/ Krätzig, W.B.: Große Naturzugkühltürme aus Stahlbeton, Derzeitiger Stand und zukünftige Entwicklung. VGB-Kraftwerkstechnik 55, 1975, Heft 3, S. 191-197.

- / 45/ Krätzig, W.B.: Neue Entwicklungen beim Bau von Naturzugkühltürmen- Theorie und Sicherheitskonzept. Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1977 in Berlin.

- / 46/ Krolewski, H.: Technische und wirtschaftliche Probleme zur Frage der Abwärme von thermischen Kraftwerken Wasserwirtschaft 63 (1973), S. 363-371.
- / 47/ Krolewski, H.: Die Kühlwassersituation in der Bundesrepublik Deutschland 1976. VGB Kraftwerkstechnik 57 (1977), H. 1, S. 16-22.
- / 48/ Krolewski, H.: Der Kraftwerksstandort Schmehausen und seine Bauteile. VGB Kraftwerkstechnik 57. T., Heft 4/1977, S. 259-269.
- / 49/ Lagrange, J.L.: Mécanique Analytique. Bd.I: Statique. Bd.II: Dynamique. Paris, Courciers, 1811, 1815.
- / 50/ Lehmkämpfer, O.: Versteifte Kühlturmschalen aus Stahlbeton. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1978.
- / 51/ Leonhardt, F.; Schlaich, J.: Vorgespannte Seilnetzkonstruktionen- Das Olympiadach in München. Der Stahlbau, H. 9.10 und 12/1972, Heft 2,3,4 und 6, 1973 41 (1972) S. 257-266, 298-301, 367-378; 42 (1978) S. 51- 58, 80, 107-115, 176-183.
- / 52/ Leonhardt, F.; Egger, H.; Haug, E.: Der Deutsche Pavillon auf der Expo '67 Montreal. Der Stahlbau 37,J, Heft 4 und 5, 1968, S. 97-106 und 138- 145.
- / 53/ Lübbecke, N.: PERS, ein ALGOL-60 Programm zur Darstellung gradlinig begrenzter, räumlicher Strukturen in Zentralperspektive. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1973, unveröffentlicht.

- / 54/ Mayr, G.; Gergermann, R.: Seile und Seilverbindungselemente für vo-gespannte Seilkonstruktionen. Drahtwelt 12 (1975) S. 489-494 und 498.
- / 55/ Mollmann, H.: Analysis of Plane Prestresses Cable Structures. Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, ST 10, pp. 2059-2082, Okt. 1970.
- / 56/ Müller, R.K.; Stiemer, S.F.; Wessoly, L.: Modelltechnik für Seilnetze. Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart. Heft Nr.5/1975.
- / 57/ Mungan, I.: Experimentelle Beuluntersuchungen und Stabilitätsnachweise für Kühlturmschalen. Konstruktiver Ingenieurbau Berichte, Vulkan-Verlag, Essen, Heft 29/30 (1977), S. 75-80.
- / 58/ Newmann, W.M.; Sproull, R.F.: Principles of interactive Computer Graphics. Mc Graw-Hill Book Company, 1973.
- / 59/ Niemann, H.J.; Peters, H.L.; Zerna, W.: Naturzugkühltürme im Wind. Der Einfluß der Oberflächenrauhigkeit auf die Beanspruchung des Schalentragwerkes, Beton- und Stahlbetonbau 67 (1972), Heft 6, S.121-129.
- / 60/ Nitsche, J.C.C.: Vorlesungen über Minimalflächen. Die Grundlagen der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellungen, Band 199. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1975.
- / 61/ Ohyama, H.; Kawamata, S.: A Problem of Surface Design for Prestressed Cable Nets. IASS Pacific Symposium- Part II, October 17-23, 1971, Tokyo and Kyoto.

- / 62/ Otto, F. et al.: Zugbeanspruchte Konstruktionen.
Band 1 und 2. Ullstein Fachverlag, Berlin/ Frankfurt/M.
Wien 1962, 1966.
- / 63/ Otto, F.; Schleyer, F.K.: Tensile Structures. 1,2,
M.I.T. Press, London 1967, 1969.
- / 64/ Otto, F.: Minimalnetze (IL 1/ 1969) Mitteilungen des
Instituts für leichte Flächentragwerke (IL). Uni-
versität Stuttgart. Leitung Frei Otto.
- / 65/ Otto, F.: Mitteilung Nr. 8 der Entwicklungsstätte
für den Leichtbau.
- / 66/ Peters, H.L.: Neue Entwicklungen beim Bau von Natur-
zugkühltürmen- Wechselbeziehungen zwischen Bauaus-
führung und Konstruktion. Vortrag auf dem Deutschen
Betontag 1977 in Berlin.
- / 67/ Poskitt, T.J.: Numerical Solution of Nonlinear Structures.
Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 93,
Nr.ST 4, pp. 69-94, Ang. 1967.
- / 68/ Roland, C.: Frei Otto- Spannweiten (Tensile Structures).
Ullstein Verlag, Berlin, Frankfurt/Main, Wien 1965
und Longmann-London (1970).
- / 69/ Schlaich, JI: Naturzugkühltürme mit Seilnetzmantel.
Sonderheft VGB Bautagung 1972. S. 10-13.
- / 70/ Schlaich, J.; Mayr, G.: Naturzugkühltürme mit vorge-
spanntem Membranmantel. Der Bauingenieur 49.J.,
Heft 2/1974, S. 41-45.

- / 71/ Schlaich, J.; Mayr, G.: Kühltürme mit Membran- und Seilnetzmantel. Int. Symposium "Weitgespannte Flächentragwerke". Stuttgart, 1976, S. 2.8-1 bis 4.
- / 72/ Schlaich, J.; Mayr, G.; Weber, P.; Jasch, E.: Der Seilnetzkühlturm Schmehausen. Der Bauingenieur 51.J., Heft 11/ 1976, S. 401-412.
- / 73/ Schleyer, F.K.: Berechnung von Seilen, Seilnetzen und Seilwerken. In: Otto F.: Zugbeanspruchte Konstruktionen, Bd.2, Ullstein Fachverlag, Berlin, Frankfurt a.M./ Wien, 1966.
- / 74/ Schrader, K.-H.: Eine Sprache und ein ALGOL-Programmsystem für Probleme der Mechanik der Systeme (MESY). Elektronische Datenverarbeitung, 9.J., Heft 3/1967, S. 101- 115.
- / 75/ Schrader, K.-H.: Programmierung dynamischer Probleme des Bauingenieurwesens mit Hilfe der an ALGOL angelehnten Sprache MESY. Vortrag zum IV. IKM, Weimar 1967, Kongreßbericht Bd. 1, S. 193-200.
- / 76/ Schrader, K.-H.: Über die Benutzung problemorientierter Sprachen. Elektronische Datenverarbeitung 10.J., Heft 8/1968, S. 400- 406.
- / 77/ Schrader, K.-H.: Systemgleichungen zur iterativen Lösung nichtlinearer Probleme mechanischer Strukturen. ZAMM (Heft zur GAMM-Tagung Prag 1968), Band 48, S.163-166.
- / 78/ Schrader, K.-H.: A Tool for Computer aided Teaching and Research in the Mechanics of Structures. M.I.T.-Bericht, M.I.T. Department of Civil Engineering, School of Engineering, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, R69-44, Juli 1969.

- / 79/ Schrader, K.-H.: Die Deformationsmethode als Grundlage einer problemorientierten Sprache. Hochschulskript BI 830, Bibliographisches Institut, Mannheim/Zürich, Hochschultaschenbücher-Verlag 1969.

- / 80/ Schrader, K.-H.: MESY, Systemprogrammierung mit Hilfe von PL/1. Angewandte Informatik, applied informatics 7/1971, S. 321-330.

- / 81/ Schrader, K.-H.: Systemgleichungen für linearisierte Schwingungen nichtlinearer Systeme um nichtlineare Grundzustände. Vortrag zum NRW-Me Kolloquium 19.Mai 1973. Intern verteiltes Kript.

- / 82/ Schrader, K.-H.: Elementverfahren der Analytischen Mechanik. Beitrag zum Seminar an der Ruhr-Universität Bochum im WS 1973/74, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Nr. 74-1 (1974).

- / 83/ Schrader, K.-H.: Ringelemente zur Berechnung zusammengesetzter Rotationsschalen. Konstruktiver Ingenieurbau in Forschung und Praxis, Festschrift Wolfgang Zerna und Institut KIB, Werner-Verlag, Düsseldorf 1976, S. 77-90.

- / 84/ Schrader, K.-H.: Phenomena and System Equations of Linearized Vibrations of Nonlinear Systems. the U.S.-Germany symposium on finite element methods, held at M.I.T., August 1976, Chapter 17. Formulations and Computational Algorithms in Finite Element Analysis. edited by Bathe, Oden, and Wunderlich.

- / 85/ Schrader, K.-H.: Erdbebenbeanspruchungen, Überblick und Berechnungskonzept. Vortrag des Kühlturm-Symposiums 1977 am Institut für K.I.B. der Ruhr-Universität Bochum, Konstruktiver Ingenieurbau Berichte, Heft 29/30, S. 44-50, Vulkan-Verlag, Essen.

- / 86/ Schrader, K.-H.: MESY, Einführung in das Konzept und Benutzeranleitung für das Programm MESY-NINI. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum Nr. 78-11 (1978).

- / 87/ Siev, A.: A General Analysis of Prestressed Nets. Publication International Association for Bridge and Structural Engineering. pp. 283-292, Zürich 1963.

- / 88/ Stauske, D.: Probleme bei der Herstellung maßgenauer Netzdoppelseile am Beispiel Kühlturm Schmehausen. Intern. Symposium. Weitgespannte Flächentragwerke. Universität Stuttgart, 6.-9.4.1976. SFB 64, S.213-1 bis 5.

- / 89/ Turner, M.J.; Dill, E.H.; Martin, H.C.; Melosh, R.J.: Large Deflections of Structures Subjected to Heating and External Loads. Journal Aerospace Sci., 27, pp.97-102, 1960.

- / 90/ Turner, M.J.; Clough, R.W.; Martin, H.C.; Topp, L.J.: Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 23, Nr. 9, pp. 805-823 and 854, Sept. 1956.

- / 91/ Thornton, C.H.; Birnstiel, C.: Three Dimensional Suspension Structures. Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 93, ST 2, pp. 247-270, April 1967.

- / 92/ V.V.: Cable Suspended Roof Construction State of the Art. Journal of the Structural Division of ASCE, June 1971, S. 1715-1761.

- / 93/ Wang, P.-H.: Statische und dynamische Untersuchung geometrisch nichtlinearer Tragwerke nach der Finite-Elemente-Methode mit Anwendung auf Seilkonstruktionen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1978.

- / 94/ Winkel, G.: Zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Tragwerkssystemen bei deterministischen und stochastischen Belastungseinflüssen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1973.

- / 95/ Zerna, W.: Neuzeitliche Baukonstruktionen für Wärme-kraftwerke. VGB-Kraftwerkstechnik 52 J., Heft 4/1972, S. 204-300.

- / 96/ Zerna, W.: Constructional Problems of Cooling Towers. The 2nd IASS Colloquium on Recommendations for the Design of Hyperbolic or other similarly shaped Cooling Towers. Brussels, 9th to 11th of Jun 1975.
Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Nr. 75-5 (1975).

- / 97/ Zerna, W.: Konstruktive Probleme beim Bau von Natur-zugkühltürmen. VGB Kraftwerkstechnik 57 J., Heft 6/1977, S. 430- 434.

- / 98/ Zerna, W.: Ausführungsmöglichkeiten von Kühltürmen und deren Wirtschaftlichkeit.
Vortrag des Kühlturm-Symposiums 1977 am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Konstruktiver Ingenieurbau Berichte, Heft 29/30, S.89-97, Vulkan-Verlag, Essen.

- / 99/ Zerna,W.: Neue Entwicklungen beim Bau von Naturzugkühltürmen- Möglichkeiten baulicher Gestaltung. Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1977 in Berlin, S. 83-95.
- /100/ Zerna,W.; Haj-Issa, S.; Lehmkämpfer, O.; Mungan,I.: Kriterien zur Optimierung des Baues von Großnaturzugkühltürmen im Hinblick auf Standsicherheit, Bauausführung und Wirtschaftlichkeit. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr.2726. Westdeutscher Verlag 1978.
- /101/ Zerna, W.; Mungan, I.: Construction of large Hyperboloidal Cooling Towers.
ASCE Convention and Exposition. American Society of Civil Engineers, Chicago, Oktober 16-20, 1978.

L e b e n s l a u f

- 25.02.1939 Geboren in Nablus / Palästina als Sohn des
Lehrers Muhiddin Haj-Issa und seiner Ehe-
frau Tharwa, geb. Subbih.
- 1945-1950 Besuch verschiedener Volksschulen in
Palästina und Syrien.
- 1950-1957 Besuch des Gymnasiums in Aleppo / Syrien;
Abschluß mit Erlangung der Hochschulreife.
- 1957-1959 Studium der Naturwissenschaften an der
Universität Damaskus / Syrien.
- 1959-1964 Studium des Bauingenieurwesens an dem
Moskauer Institut für Bauingenieure
"Kuijbischew", Moskau / UdSSR;
Abschluß durch Diplom-Hauptprüfung.
- 1964-1966 Verschiedene Tätigkeiten als Angestellter
in Aleppo / Syrien.
- 1966-1967 Besuch des Goethe-Institut in Lüneburg/BRD.
- 1967-1971 Studium des Bauingenieurwesens an der
Technischen Hochschule Aachen;
Abschluß durch Diplom-Hauptprüfung.
- 1971-1972 Tätigkeit in einer Baufirma in Algier/Algerien.
- 1972-1974 Tätigkeit im Ingenieurbüro von Prof.Dr.-Ing.
Dr.-Ing.E.h. W. Zerna in Bochum
- 1974-1979 Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl I
des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
der Ruhr-Universität Bochum.
Ordinarius: Prof. Dr.-Ing.Dr.-Ing.E.h. W.Zerna

